LE CIEL

PARIS. — TYPOGRAPHIE LAHURE
Rue de Fleurus, 9



COMÈTE DE DONATI

Vue à Paris, le 4 Octobre 1858.

... et ... Benoist del. Imp. ... Paris.

LE CIEL

NOTIONS ÉLÉMENTAIRES

D'ASTRONOMIE PHYSIQUE

PAR

AMÉDÉE GUILLEMIN

CINQUIÈME ÉDITION

ENTIÈREMENT REFONDUE, CONSIDÉRABLEMENT AUGMENTÉE

ET CONTENANT

62 GRANDES PLANCHES DONT 22 TIRÉES EN COULEUR

ET 361 VIGNETTES INSÉRÉES DANS LE TEXTE



PARIS

LIBRAIRIE HACHETTE ET Cie

79, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 79

1877

A

MA FEMME ET A MES ENFANTS

AVANT-PROPOS

DE LA CINQUIÈME ÉDITION

La nouvelle édition du *Ciel*, que nous publions aujourd'hui, n'est pas une simple réimpression, ni même, selon l'expression admise, une édition *revue et augmentée*. C'est une refonte presque entière de l'ouvrage dont le public a accueilli, avec une si persévérante bienveillance, en France et à l'étranger, les éditions et traductions successives.

Toutefois, la refonte dont il s'agit ne touche ni au cadre, ni au plan de cet essai d'astronomie populaire. Le mode d'exposition, la forme simple du langage que l'auteur s'efforce avant tout de rendre précis et clair, la méthode si naturelle d'enseignement qui consiste à parler aux yeux par la représentation ou l'image des phénomènes, autant qu'à l'esprit par une description familière, tout ce qui, en un mot, donnait au livre sa physionomie propre, reste pour ainsi dire intact dans l'édition nouvelle.

Ce qui a dû changer, c'est ce qui a changé en effet dans le sujet lui-même, non les phénomènes sans doute qui sont, comme la nature, immuables, mais la connaissance qu'en

donne la science agrandie, modifiée et, à certains égards, transformée par les progrès continus de dix années d'observations nouvelles.

Entrons à cet égard dans quelques détails.

On sait qu'une nouvelle méthode d'observation, l'analyse spectrale des sources de lumière, a permis d'aborder des questions inaccessibles jusque-là, notamment la constitution physique et chimique des corps célestes, des astres qui composent le monde solaire comme de ceux dont l'ensemble forme l'univers sidéral, en un mot du Soleil, des planètes et des comètes, des nébuleuses et des étoiles. Appliquée au Soleil, et heureusement perfectionnée, cette méthode a permis de recueillir pour ainsi dire journellement des faits, que les éclipses totales, si rares, permettaient auparavant de saisir à peine, pendant la courte durée de l'obscurité totale. Les matériaux les plus précieux se sont accumulés ainsi depuis moins d'une dizaine d'années. Ils ont renouvelé, on pourrait dire bouleversé de fond en comble les vues hypothétiques qu'on se faisait auparavant sur la constitution physique et chimique de notre étoile centrale.

L'auteur a dû donner place à ces faits nouveaux, si intéressants, si imprévus, étendre et refondre les chapitres relatifs au Soleil, à ses taches, aux facules et aux protubérances, et, donnant le pas aux faits sur les conjectures, présenter l'état actuel de la science sur ce point capital d'astronomie physique.

Appliquée aux planètes, aux comètes, aux étoiles, aux nébuleuses, l'analyse spectrale ne s'est guère trouvée moins féconde. Les résultats obtenus ont jeté un jour nouveau, non sur la structure de l'univers dans son ensemble, — c'est un

point que le télescope a seul élucidé jusqu'ici, — mais sur la composition de la matière dont les plus lointaines étoiles sont formées.

Un autre progrès capital de l'astronomie dans ces dernières années, a été réalisé, grâce à l'accumulation de longues séries d'observations de météores, et à la discussion savante que divers astronomes en ont su faire. Nous voulons parler des étoiles filantes, des essaims de matière cosmique que la Terre rencontre dans sa route, qui se montrent à nous sous la forme de météores fugitifs, et qui paraissent décidément rattachés à la famille de ces vagabondes du ciel, que l'on nomme *les Comètes*. Là encore, l'auteur a dû compléter la description des phénomènes, et exposer, avec les développements nécessaires, l'explication ingénieuse qu'ils ont suggérée.

Enfin, un événement astronomique, aussi important pour la science qu'il est rare, le passage de la planète Vénus au devant du Soleil, a été observé en décembre 1874; bien que la discussion des observations ne soit point encore terminée, on a pu indiquer quelques-uns des résultats obtenus : ces résultats ont pour objet la distance de la Terre au Soleil, c'est-à-dire l'unité fondamentale des grandes mesures planétaires et stellaires, et, comme conséquence, la détermination de la masse de notre planète rapportée à celle du Soleil, élément d'une si haute importance pour les théories astronomiques; les particularités du phénomène ont offert aussi quelque intérêt pour la constitution physique de Vénus.

Voilà pour les changements principaux, pour les additions importantes.

Nous ne ferons que mentionner les additions de détail, beaucoup plus nombreuses, que les progrès journaliers de

l'astronomie ne pouvaient manquer de nécessiter dans un ouvrage du genre du *Ciel*.

En résumé, l'édition que nous publions aujourd'hui est plus volumineuse de moitié que les premières. Le nombre des vignettes et des planches a dû s'accroître dans la même proportion. En changeant le mode de souscription, en adoptant la publication par livraisons hebdomadaires, nous avons cru répondre au désir du public de plus en plus nombreux qui s'intéresse aux sciences ou les cultive, et rendre accessible à un plus grand nombre de lecteurs l'acquisition de l'ouvrage. L'accueil fait à cette édition nouvelle nous a prouvé que nos prévisions étaient justes.

Dans les éditions précédentes, en indiquant les sources d'information auxquelles il avait puisé, l'auteur a donné une longue liste des savants qui avaient bien voulu lui prêter leur concours, en lui communiquant leurs travaux, leurs observations et leurs dessins. Il manquerait à son devoir, s'il ne joignait à ces noms ceux de M. Janssen, de M. Wolf, qui l'ont autorisé, le premier, à reproduire une de ses belles photographies du Soleil et une épreuve du passage de Vénus, observé par lui à Kobé, le second, à réduire sa belle carte du groupe des Pléiades. Il est heureux de pouvoir ici témoigner à ses deux savants compatriotes la reconnaissance qu'il leur doit; il envoie le même témoignage à M. Tacchini, de l'observatoire de Palerme, à MM. Warren de la Rue et Huggins, à MM. Langley et Trouvelot, à M. le Dr Heis, et enfin à tous les savants des deux mondes, dont il a dû mettre à contribution les observations, dessins, notes et mémoires.

Mai 1877.

LE CIEL

Qu'est-ce que le Ciel?

Où sont les rivages de cet océan, où est le fond de cet insondable abîme?

Que sont ces points lumineux, ces innombrables astres qui, en apparence immuables, rayonnent incessamment leurs feux dans l'immensité? Sont-ils semés au hasard, sans ordre, sans autre liaison que celle donnée par la perspective, ou ne forment-ils pas plutôt des groupes naturels, des associations célestes? Si les étoiles ne sont point immobiles, ainsi qu'on se l'était longtemps figuré, et s'il n'est plus permis de les regarder — conception enfantine — comme des clous d'or fixés à une voûte solide et transparente, vers quelles régions de l'espace dirigent-elles leur course éternelle? Quelle force les tient en équilibre, détermine et règle leurs mouvements? Quel rôle enfin le Soleil, notre Terre et toutes les terres qui font cortége à l'astre radieux, jouent-ils dans ce concert des corps célestes, dans cette sublime harmonie de l'Univers?

Magnifiques problèmes que l'imagination la plus féconde eût en vain essayé de résoudre, si, pour la gloire de l'esprit humain, une science, la plus anciennement constituée de toutes les sciences naturelles, l'Astronomie, n'était enfin parvenue en

se dégageant de toute vaine hypothèse, à en formuler avec netteté les solutions.

Étonnante puissance de l'homme ! Enchaîné à la surface de la Terre, atome intelligent sur ce grain de sable perdu dans l'espace, il invente des appareils qui centuplent la pénétration de sa vue ; il sonde les profondeurs de l'abîme éthéré, jauge les dimensions de l'univers visible, et dénombre les myriades d'astres qui en peuplent l'effrayante étendue ; il étudie ensuite leurs mouvements les plus compliqués, mesure avec précision les dimensions et les distances des plus rapprochés de la Terre, évalue leurs masses ; puis, découvrant dans le pêle-mêle des groupes artificiels les associations réelles, il arrive à reconnaître l'ordre au milieu d'une apparente confusion.

Il fait plus.

S'élevant par un suprême effort de la pensée aux plus abstraites spéculations, il trouve la loi qui régit tous les mouvements célestes, et, reliant ainsi la Physique à l'Astronomie, la Terre au Ciel, il parvient à définir la nature de la force universelle qui équilibre les mondes : la pesanteur n'est plus qu'un cas particulier de la gravitation.

Tels sont les fruits de l'immense labeur de vingt générations d'astronomes. Telle est l'œuvre du génie et de la patiente persévérance des hommes qui se vouent depuis deux mille ans à l'étude des phénomènes dont le ciel est le théâtre.

Les bergers chaldéens furent, dit-on, les premiers astronomes. Cela se conçoit. Au milieu des vastes plaines où la clémence de la température leur permettait de passer la nuit en plein air, où la pureté du ciel les mettait sans cesse en présence du plus beau de tous les spectacles, ils devaient être et ils furent surtout des astronomes contemplatifs. Et tous nous serions ce qu'ils furent, si l'âpreté du climat et la rareté des belles nuits ne nous ôtaient trop souvent l'occasion d'observer

le ciel, si d'ailleurs les préoccupations et les agitations de la vie civilisée nous en laissaient le loisir.

Rien au monde, en effet, ne semble plus propre à élever la pensée vers l'infini, que la contemplation silencieuse de la voûte étoilée, pendant une nuit sereine.

Des milliers de feux étincellent de toutes parts sur le sombre azur du ciel. Variés de couleurs et d'éclat, les uns resplendissent d'une vive lumière, perpétuellement mobile et scintillante; d'autres brillent d'une lueur plus égale, plus tranquille et plus douce; un grand nombre semblent n'envoyer leurs rayons que par jets interrompus : on dirait qu'ils ont peine à percer les profondeurs de l'espace. Pour jouir de ce spectacle dans toute sa magnificence, il faut choisir une nuit où l'atmosphère ait toute sa pureté, toute sa transparence, et ne soit illuminée ni par la Lune, ni par les lueurs du crépuscule ou de l'aurore. Le ciel alors ressemble à une mer immense, dont la surface serait toute parsemée d'une poussière d'or et de diamant. En présence d'une telle splendeur, les sens, l'esprit, l'imagination sont ravis à la fois. L'impression qu'on ressent est une émotion profonde, religieuse, indéfinissable mélange d'admiration, de calme et de douce mélancolie. Il semble que ces mondes lointains, en rayonnant vers nous, se mettent en communication intime avec notre pensée; et les natures rêveuses aiment, en ce moment, à redire les belles strophes du plus harmonieux de nos poëtes :

. . . .

Doux reflet d'un globe de flamme,
Charmant rayon, que me veux-tu?
Viens-tu dans mon sein abattu
Porter la lumière à mon âme?

Descends-tu pour me révéler
Des mondes le divin mystère,
Ces secrets cachés dans la sphère
Où le jour va te rappeler?

Une secrète intelligence
T'adresse-t-elle aux malheureux?
Viens-tu, la nuit, briller sur eux
Comme un rayon de l'espérance?

Viens-tu dévoiler l'avenir
Au cœur fatigué qui l'implore?
Rayon divin, es-tu l'aurore
Du jour qui ne doit pas finir?
. . . .

Mais le sentiment n'a qu'une part dans l'émotion du spectateur, et bientôt l'intelligence reprend ses droits. Poussée par une curiosité invincible, que la poésie la plus sublime ne saurait satisfaire, elle se demande comment ces myriades d'étoiles, çà et là disséminées, ont pu révéler à ceux qui les ont étudiées la structure même de l'Univers ; par quelle méthode ils sont parvenus à se débrouiller dans cette confusion, à calculer les distances des astres, à en déterminer les mouvements. Plus loin j'essayerai de donner une idée de la solution de ces intéressants problèmes ; maintenant, et avant d'entrer dans une description plus détaillée, je vais tâcher d'esquisser dans son ensemble le panorama de l'Univers.

Jetons encore un coup d'œil sur la voûte du ciel.

Au premier aspect, les étoiles y semblent assez également disséminées : cependant, regardez cette lueur blanchâtre, indécise, vaporeuse, qui entoure tout le firmament comme une ceinture. C'est la Voie Lactée[1]. A mesure que les regards s'approchent des bords de ce nuage céleste, les étoiles se pressent de plus en plus nombreuses, et la plupart si petites que l'œil les distingue à peine. L'accumulation dont il s'agit est surtout sensible, quand on explore ces régions du ciel à l'aide des té-

1. *Via lactea*, voie de lait. Les Grecs disaient γαλαξία, dans le même sens. On trouve aussi dans les ouvrages astronomiques les noms de *galaxie*, de zone ou de ceinture *galactique*.

lescopes. L'observation montre alors que la Voie Lactée elle-même n'est autre chose qu'une zone prodigieusement étendue d'étoiles, c'est-à-dire de soleils, puisque, comme nous le verrons plus loin, chaque étoile, depuis la plus brillante jusqu'à la plus faible, est un foyer de lumière et de chaleur, en un mot, est un soleil. Plus les instruments qui servent à explorer ces profondeurs sont puissants, plus l'œil peut à leur aide pénétrer dans des régions éloignées de l'espace, plus on reconnaît que les couches de cette poussière lumineuse se prolongent. Limitée dans le sens de la largeur, la zone d'étoiles qui constitue la Voie Lactée semble indéfinie en profondeur. Néanmoins elle forme un tout bien distinct.

Voilà donc un groupe immense, une association effrayante de mondes, qui semble embrasser tout l'Univers, s'il est vrai que le plus grand nombre des étoiles éparses, qui paraissent situées hors de la Voie Lactée, en font néanmoins partie. En réalité, cette fourmilière de millions de soleils se partage elle-même en groupes nombreux et distincts, en amas stellaires, et ceux-ci en associations plus restreintes encore, chacune composée de deux ou trois soleils, et finalement en étoiles isolées.

Quelle étendue occupe chacun de ces groupes, sur quel espace mille fois plus vaste s'étend leur ensemble ? C'est ce que l'imagination la plus puissante essayerait en vain de se figurer d'une manière sensible ; c'est ce dont les nombres ne parviennent à donner qu'une idée imparfaite. J'ajoute ici, et sans commentaire, un fait bien démontré sur lequel nous reviendrons, et qui paraîtra sans doute étrange à beaucoup :

Le Soleil est une étoile de la Voie Lactée.

Les milliers d'étoiles disséminées que nous voyons à l'œil nu ne sont en effet que les composantes du groupe dont fait partie notre étoile ; ce groupe, en un mot, est un des nombreux amas qui forment la Voie Lactée elle-même.

Mais ce n'est encore là qu'une première ébauche de la structure de l'Univers visible.

En parcourant avec attention toutes les parties de la voûte étoilée, une bonne vue aperçoit çà et là quelques taches blanchâtres pareilles à de petits nuages. On dirait autant de lambeaux détachés de la Voie Lactée dont ils sont d'ailleurs souvent très-distincts et très-éloignés. Les télescopes découvrent par milliers ces nébulosités, ou, pour leur donner leur nom astronomique, ces nébuleuses. Eh bien, un grand nombre de ces nuages célestes ne sont rien autre chose que des accumulations d'étoiles souvent très-pressées et très-nombreuses. Ce sont comme autant de voies lactées différentes, situées en dehors de la nôtre, mais la plupart si éloignées que les plus puissants instruments n'y distinguent qu'une lueur confuse. Selon la belle expression d'Humboldt : « Ce sont autant de véritables îles dans l'océan des mondes. » D'autres amas laissent à peine apercevoir, sur le fond de la nébulosité qui les forme, quelques points scintillants, quelques soleils, plus gros sans doute ou plus lumineux que les autres.

Qu'on s'efforce maintenant d'imaginer quelles distances effrayantes séparent ces archipels stellaires ! Notre Soleil, dans son groupe, est séparé du soleil le plus voisin par un intervalle tel, que la lumière met trois années au moins à le franchir : or la lumière, en une seconde de temps, parcourt trois cent mille kilomètres, soixante-quinze mille lieues ; calculez le chemin qu'elle fait en trois ans ! Multipliez cette distance, vous n'aurez que les dimensions de l'amas ; multipliez ces dimensions, vous n'arriverez qu'à mesurer la Voie Lactée elle-même ; multipliez encore cette nouvelle distance et vous saurez à peine quel intervalle sépare les voies lactées les unes des autres. Des centaines, des milliers, des millions d'années sont nécessaires à l'ondulation lumineuse pour franchir de tels espaces, et cependant vous n'êtes point encore sorti des bornes de l'Univers visible !

Abîmes insondables, dont les perfectionnements des télescopes ne font qu'accroître indéfiniment l'indicible profondeur! Gouffres sans fin, sans fond, mais au sein desquels il n'y a pas de ténèbres : des millions de soleils y répandent partout la lumière!

On a longtemps douté si toute nébuleuse peut se résoudre en soleils distincts. Une étude plus délicate et plus approfondie a fini par faire reconnaître, comme le soupçonnait déjà au siècle dernier un grand astronome, W. Herschel, que toutes les nébuleuses ne sont pas des amas d'étoiles : il en est qui paraissent formées de masses diffuses d'une matière gazeuse, brillant d'une lumière qui lui est propre. Ainsi se trouvent en partie confirmées les vues de l'observateur que nous venons de nommer, sur la nature particulière de ces vastes et informes amas, où l'œil distingue des régions plus condensées, des points plus lumineux, peut-être des soleils en voie de formation ; l'analyse spectrale de la lumière de ces nuages célestes a en quelque sorte justifié les hardies spéculations d'un savant qui alliait au génie de l'observation celui des conceptions les plus élevées. Certaines nébuleuses seraient ainsi des laboratoires de mondes!

Tel nous apparaît l'Univers, de l'observatoire où nous a placés la nature ; telle est la conception que la science nous permet de nous faire du grand tout, quand nous prenons l'astronomie pour guide. Mais, pour avoir une idée plus complète de sa constitution, de l'infinie variété de sa structure, cette esquisse à grands traits, cette vue à vol d'oiseau est insuffisante ; il nous faut redescendre maintenant de ces régions où la vue et la pensée se perdent, jusqu'à l'un de ces mondes, plus voisins de nous, et dès lors plus accessibles aux investigations de l'homme, monde principalement constitué par une étoile isolée, par une molécule sidérale : c'est nommer l'é-

toile même à laquelle est lié notre globe, le monde particulier dont notre Terre fait partie.

Le Soleil est le centre de ce groupe élémentaire.

Tout autour du globe radieux, foyer de lumière et de chaleur, en même temps que réservoir de puissance, mais à des distances très-diverses et en des périodes très-inégales, circulent plus de cent astres secondaires, dont quelques-uns sont eux-mêmes accompagnés de corps célestes plus petits, de satellites. Non lumineux par eux-mêmes, ces astres seraient invisibles pour nous, si leurs distances n'étaient infiniment plus petites que celles des étoiles mêmes, et si la lumière qu'ils reçoivent du Soleil, réfléchie vers la Terre, ne les faisait apparaître comme de simples points lumineux semés sur la voûte céleste comme autant d'étoiles. Telle serait la Terre elle-même, vue de l'espace, à une distance suffisamment grande.

D'ailleurs, un caractère commun à tous les corps célestes qui font partie du Monde Solaire a permis de les distinguer, de tout temps, au milieu de la multitude des autres étoiles. Tandis que les soleils, isolés ou groupés, composant ce qu'on peut appeler l'Univers Sidéral, sont situés à des distances pour ainsi dire infinies, les astres du groupe dont nous parlons, relativement beaucoup plus rapprochés de la Terre, se trouvent vraiment nos voisins.

Que résulte-t-il de ce double fait? Deux conséquences bien simples, bien faciles à comprendre.

La première, c'est que les soleils, les étoiles véritables, n'éprouvent pas de déplacements sensibles sur la voûte étoilée. Leur éloignement est tel, qu'ils semblent véritablement immobiles au sein de l'espace : de là cette très-ancienne dénomination d'*Étoiles fixes*, aujourd'hui abandonnée, parce qu'une étude minutieuse et délicate de leurs positions relatives a fini par prouver qu'elles se meuvent réellement dans les régions lointaines du ciel. L'immobilité apparente dont nous venons de parler, et qui est un de leurs caractères propres, se manifeste

par la constance de forme que conservent pendant des siècles les groupes réels ou artificiels d'étoiles, ceux auxquels on donne le nom de Constellations.

Il en est tout autrement des astres qui entourent notre Soleil : ils sont assez proches de la Terre, pour que leurs déplacements dans l'espace se laissent apercevoir en de courts intervalles de temps. Comme ils parcourent successivement en vertu de leurs mouvements propres, sur le fond de la voûte étoilée, des chemins particuliers à chacun d'eux, chemins en apparence d'autant plus grands que leur éloignement est moindre, on leur donna dès l'origine la dénomination qu'ils ont conservée, celle de *Planètes* (corps errants).

N'est-ce pas ainsi qu'au milieu d'une vaste plaine nous croyons immobiles les objets les plus éloignés, ceux qui bordent l'horizon, tandis que les moindres déplacements des objets voisins nous paraissent très-sensibles? Il est vrai que, dans le cas où nous nous déplacerions nous-mêmes, — c'est le cas de la planète la Terre, — les mouvements réels se compliqueraient de mouvements apparents qu'il faudrait distinguer des premiers, si nous voulions avoir une idée exacte des véritables chemins parcourus. Cette complication des mouvements apparents des planètes, conséquence forcée du mouvement même de la Terre, est aujourd'hui l'un des témoignages les plus frappants de la réalité de celui-ci ; mais aussi, il faut le dire, là précisément fut la pierre d'achoppement de l'ancienne astronomie, jusqu'à l'époque, d'ailleurs assez moderne, où les vrais mouvements ont été reconnus, où Copernic mit en pleine lumière le véritable Système du Monde.

Ainsi s'est peu à peu dégagée et est devenue saisissante une idée qui nous paraît bien simple aujourd'hui, qui a dû paraître étrange à ceux qui l'ont autrefois les premiers aperçue. C'est qu'il n'y a nulle opposition réelle entre les choses terrestres et les choses célestes, c'est qu'avec la Terre,

passagers d'un navire flottant sur l'océan éthéré, nous voguons, nous voyageons dans le Ciel même.

Les planètes sont d'autres Terres, plus ou moins semblables à la nôtre. Nous venons de dire, *plus ou moins semblables;* en effet, on verra bientôt, dans la description détaillée de chacune des planètes du monde solaire, quelle variété règne au sein de cette association céleste. Mouvements de rotation, mouvements de révolution autour du foyer commun, durée de ces mouvements, distances, formes et dimensions, distribution de lumière et de chaleur, tout change quand on passe d'une planète à l'autre. Et cependant, chose merveilleuse, les mêmes lois les régissent toutes, de sorte que l'unité de plan ne ressort pas moins éclatante que l'étonnante diversité des phénomènes.

Une circonstance commune à tous les astres du système solaire frappe toujours vivement l'imagination. C'est que ces masses énormes, ces globes dont plusieurs sont beaucoup plus gros et pèsent beaucoup plus que la Terre, et enfin la Terre même, non-seulement sont suspendus dans l'espace, mais encore se meuvent au sein de l'éther avec des vitesses vraiment effrayantes. Supposez-vous, par la pensée, spectateur immobile et indépendant, en un coin du ciel. Un globe lumineux apparaît au loin : peu à peu vous le voyez s'approcher et grandir; son immense circonférence, qui dépasse cent mille lieues, est entraînée dans un mouvement rapide de rotation qui fait parcourir à chacun de ses points plus de trois lieues par seconde. Le globe lui-même enfin passe devant vous, emporté dans l'espace avec une rapidité vingt-quatre fois aussi grande que celle d'un boulet de canon. Tel vous paraîtrait Jupiter, circulant dans le ciel; telles sont toutes les autres planètes, qui se meuvent d'autant plus vite qu'elles sont plus voisines du Soleil, foyer commun de leurs mouvements. Leur course vertigineuse les emporterait pour jamais dans les plus lointaines

régions de l'univers visible, si chacune n'était maîtrisée et retenue par l'attraction puissante d'un globe qui est des milliers, des millions de fois plus volumineux et plus pesant que le sien, par le Soleil lui-même.

Le Soleil pèse 325 000 fois autant que le globe terrestre!

Dans quelle balance prodigieuse les astronomes ont-ils donc pesé les astres, pour annoncer avec simplicité et confiance un si étonnant résultat? Tel est en réalité le degré de puissance où la science — il y a longtemps déjà — est parvenue, et nous verrons qu'il est possible de concevoir, sans être initié aux transcendances de l'Astronomie, la possibilité de la solution d'un problème au premier abord insoluble. Rendons honneur, en passant, aux grands hommes qui ont contribué à le résoudre : nommons Képler, Galilée, Huygens, nommons Newton, le plus grand de tous!

Non-seulement l'Astronomie démontre, par d'irréfutables preuves, la réalité des mouvements planétaires, non-seulement elle est arrivée à reconnaître leur invariable constance, au moins pour des milliers de siècles; mais c'est dans leur vitesse même et dans la force attractive de la masse du Soleil, qu'elle a trouvé la raison de l'équilibre des corps célestes, de la pondération de tout le système.

Si l'on a peine à se figurer de telles masses circulant librement au sein de l'éther, combien n'est-on pas plus impressionné encore, quand on songe que des mouvements aussi rapides ne sont pas particuliers aux planètes, et qu'on se représente le Soleil avec tout son cortége se mouvant dans une orbite encore inconnue, attiré sans doute lui-même par un soleil plus puissant, ou par un groupe de soleils. Toutes ces étoiles, que leurs distances infinies font d'abord paraître immobiles, se meuvent en différents sens; on a pu démêler dans ces mouvements, qui ne deviennent sensibles qu'après des années des plus minutieuses observations, une part apparente due à différentes causes parmi lesquelles on a reconnu le mouvement de la lumière,

celui de la Terre, celui du monde solaire lui-même; puis, une part réelle provenant de leurs mouvements particuliers. Or, nous le verrons plus tard, si ces derniers mouvements s'effectuent avec une extrême lenteur, cette lenteur n'est qu'apparente[1] : en réalité, c'est dans les systèmes stellaires qu'on trouve les mouvements célestes les plus rapides de tous.

Ainsi, la Terre tourne sur elle-même, et elle tourne autour du Soleil, emportant la Lune dans son mouvement; le Soleil se meut autour de quelque centre inconnu; le groupe sidéral dont il fait partie n'est-il pas lui-même emporté dans une orbite de degré supérieur, simple élément d'une courbe plus vaste encore? Et ainsi indéfiniment, sans que la pensée puisse assigner de terme à cet enchaînement de systèmes. Qui décrira les courbes suivies dans l'espace, les cycloïdes décrites par le Soleil, par la Terre et les autres planètes, par notre satellite enfin, dans ce tourbillon de circulations engrenées?

Combien faut-il de siècles, que dis-je, de milliers de siècles[2] pour que ces immenses voyages de circumnavigation sidérale s'accomplissent en entier? On l'ignore. Mais, à coup sûr, leurs vastes périodes doivent être à la durée de notre année, ce que

1. « Supposons un instant, dit Humboldt, que ce qui ne peut être qu'un rêve de notre imagination se réalise; que notre vue, dépassant les limites de la vision télescopique, acquière une puissance surnaturelle, que nos sensations de durée nous permettent de comprendre et de resserrer, pour ainsi dire, les plus grands intervalles de temps; aussitôt disparaît l'immobilité apparente qui règne dans la voûte des cieux. Les étoiles sans nombre sont emportées, comme des tourbillons de poussière, dans des directions opposées; les nébuleuses errantes se condensent ou se dissolvent; la voie lactée se divise par places, comme une immense ceinture qui se déchirerait en lambeaux; partout le mouvement règne dans les espaces célestes, de même qu'il règne sur la terre, en chaque point de ce riche tapis de végétaux, dont les rejetons, les feuilles et les fleurs présentent le spectacle d'un perpétuel développement. » (*Cosmos.*)

2. Le mouvement du système solaire dans l'espace lui fait franchir en une année plus d'une fois et demie la distance du Soleil à la Terre. Il ne lui faudrait pas moins cependant de 122 000 années pour aller rejoindre l'étoile la plus voisine du Soleil.

les dimensions de la Terre sont aux distances des étoiles; « ces périodes forment, selon la belle expression d'Humboldt, comme une horloge éternelle de l'Univers. » Ainsi l'idée de la durée infinie s'impose à l'esprit, dans la contemplation des phénomènes célestes, avec la même irrésistible puissance que l'idée de l'infinité de l'étendue.

Qu'est-ce donc, pour terminer cette esquisse si incomplète et si imparfaite de l'univers visible, qu'est-ce en résumé que le Ciel? Deux lignes peuvent suffire à formuler la réponse : Au sein de l'espace sans bornes, dans le cours infini du temps, le mouvement sans fin de la matière. Tantôt de la matière condensée en sphères radieuses, en foyers, en sources vives de vibrations qui se propagent avec une vitesse foudroyante sous la forme des ondes de l'éther; tantôt de la matière condensée en globes obscurs par eux-mêmes, mais recevant ces ondes bienfaisantes, les transformant, puis les réfléchissant dans l'espace; tantôt enfin de la matière disséminée, étendue en d'immenses masses informes, où s'élaborent avec les siècles les soleils et les mondes futurs. Partout la lumière et la chaleur, partout les forces physiques et chimiques qu'elles engendrent, partout enfin conséquemment les premières conditions de la vie, et avec la vie, de la pensée, fière de contempler, d'étudier et de connaître tant et de si merveilleux phénomènes!

Tel est le champ exploré par l'Astronomie.

Les autres sciences physiques et naturelles nous apprennent à sonder la nature dans ses mystères les plus intimes : elles nous dévoilent la constitution moléculaire des corps, le jeu de leurs combinaisons et de leurs métamorphoses, leurs mille propriétés utiles ou curieuses; le développement des êtres organisés et vivants, végétaux et animaux; celui de l'homme enfin, dont l'un des plus nobles attributs est à coup sûr le

don même de connaître, et qui apparaît, sous le flambeau de la science, comme le plus parfait épanouissement des forces organisatrices.

Mais l'Univers même, dans son majestueux ensemble, c'est l'Astronomie qui nous le révèle ; c'est elle qui nous en fait comprendre la structure, et, après avoir rassemblé dans un tableau grandiose ses mille éléments variés, nous initie aux lois éternelles qui régissent les mondes.

Science sublime, dont les enseignements nous rapetissent sans doute au point de vue matériel, mais qui élève l'homme intelligent et moral jusqu'à la conception de l'harmonie universelle, jusqu'à la contemplation de l'infini !

PREMIÈRE PARTIE



LE MONDE SOLAIRE

PREMIÈRE PARTIE

LE MONDE SOLAIRE

§ 1. LE SOLEIL. — LES PLANÈTES ET LEURS SATELLITES. LE SYSTÈME PLANÉTAIRE.

On donne en Astronomie le nom de *Système* ou *Monde solaire* à un groupe d'astres dont la Terre fait partie, astres qui ont tous le Soleil pour centre ou foyer commun de leurs mouvements. Voici quelle est, dans l'état actuel de nos connaissances, la composition du monde solaire :

1° *Un corps central*, relativement immobile dans le groupe, de beaucoup plus volumineux que tous les autres, et lumineux par lui-même, LE SOLEIL;

2° *Cent soixante-sept corps secondaires*, ou *planètes*, situés à des distances croissantes du Soleil, circulant autour de lui dans des orbes à fort peu de chose près circulaires, et recevant du Soleil la lumière qui les rend visibles dans le ciel.

Les planètes peuvent se ranger en trois groupes principaux :

Celui des *planètes moyennes*, les plus rapprochées du corps central, et qui sont, dans l'ordre de leurs distances croissantes au Soleil : MERCURE, VÉNUS, LA TERRE, MARS;

Le groupe des *grosses planètes*, les plus éloignées du corps central : JUPITER, SATURNE, URANUS, NEPTUNE ;

Enfin, celui des *petites planètes*, formant entre Mars et Jupiter comme un anneau qui sépare les deux premiers groupes. On connaît aujourd'hui 159 petites planètes, mais elles sont sans doute beaucoup plus nombreuses, et il ne se passe guère d'année qu'on n'en découvre de nouvelles ;

3° *Dix-huit corps tertiaires* ou *satellites*, circulant autour de quelques-unes des planètes principales : telle est la LUNE, accompagnant la Terre. Jupiter a quatre satellites ; Saturne en a huit ; Uranus quatre ; Neptune un seul.

Voilà donc déjà, en y comprenant le Soleil, 186 corps célestes : 1 globe central qui commande aux mouvements des 167 planètes énumérées plus haut, et 18 satellites formant avec leurs planètes principales cinq mondes en miniature, dont chacun offre avec le système planétaire général une frappante analogie.

Sur ces 186 astres, les Anciens n'en connaissaient que 8 : le Soleil, la Terre et la Lune, Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne, c'est-à-dire tous ceux qu'on distingue aisément à l'œil nu. Mais on sait que, trompés par les apparences, ils considéraient la Terre comme immobile au centre du monde, et faisaient mouvoir autour d'elle, outre le Soleil, la Lune et les cinq autres planètes, toutes les étoiles prétendues fixes, tous les astres dont les feux brillent en des régions plus éloignées du ciel.

Depuis trois siècles que Copernic a reconnu le vrai système du monde, l'invention des lunettes a fait découvrir des planètes nouvelles, ainsi que les satellites des planètes connues, Jupiter et Saturne. Uranus a été trouvé il y a moins d'un siècle (en 1781) ; les 159 petites planètes ont été successivement découvertes depuis 1801 jusqu'à nos jours (février 1876), et Neptune l'est seulement depuis vingt-neuf ans. Il n'est pas impossible que des planètes plus éloignées que Neptune, ou plus voisines du Soleil que Mercure, viennent un jour

révéler leur existence aux astronomes, et agrandir ainsi la sphère d'action du Soleil. Mais toute recherche de ce genre a été vaine jusqu'ici.

Avant de compléter l'énumération des corps célestes qui composent le monde solaire, arrêtons-nous un instant à la considération du groupe des planètes et de leurs satellites. Ce groupe constitue le *Système planétaire*.

Tous les corps célestes qui le composent sont affectés de deux mouvements principaux. L'un de ces mouvements consiste en une rotation autour de l'un des diamètres du globe ou sphéroïde qui forme l'astre; et l'axe de rotation dont nous parlons conserve une direction à peu près invariable dans l'espace. Le Soleil, les planètes et leurs satellites sont tous animés de ce premier mouvement.

Le second est un mouvement de translation qui entraîne toutes les planètes autour du Soleil, et en même temps chaque satellite autour de la planète principale, que ce satellite suit dans sa translation circumsolaire. Nous verrons plus tard que le Soleil se meut lui-même dans l'espace, entraînant avec lui tout le cortége des planètes et de leurs satellites [1].

§ 2. LES COMÈTES, LES ÉTOILES FILANTES, LA LUMIÈRE ZODIACALE.

Achevons notre énumération des astres ou autres agrégations matérielles, composant le monde solaire.

1. Les mouvements de rotation et de translation des Planètes, dont les périodes déterminent, sur chacune d'elles, la durée du jour et celle de l'année, sont en outre soumis à des oscillations périodiques, précession, nutation, variations séculaires des éléments de l'orbite, qui échappent par leur lenteur à l'observation vulgaire. La *Mécanique céleste*, science qui a pour objet la théorie des mouvements des astres et leurs causes, rend compte de ces apparentes anomalies, dont la découverte est due à la précision croissante des observations astronomiques, depuis Hipparque jusqu'aux temps modernes.

Outre les planètes, une multitude innombrable d'autres astres décrivent autour du Soleil des orbites le plus souvent très-allongées : ce sont les *comètes*, sortes d'étoiles nébuleuses qui se distinguent encore des planètes et des autres étoiles par une traînée lumineuse ou queue, dont la forme et les dimensions variées paraissent changer avec la distance de l'astre au Soleil. Nombre de comètes se montrent sans que l'histoire ait conservé le souvenir de leurs apparitions antérieures, et l'on ignore si on les reverra jamais; quelques-unes cependant ont été revues plusieurs fois à des intervalles périodiques, et l'époque du retour de plusieurs autres a été calculée, de sorte qu'on peut, avec quelque certitude, les considérer comme faisant partie intégrante du Monde solaire. On croit que certaines comètes se meuvent dans des courbes à branches infinies et ne traversent qu'une fois le système, dont elles ne font ainsi partie que temporairement.

Indépendamment des grands corps célestes qui composent l'agglomération planétaire et cométaire, des myriades de corpuscules beaucoup plus petits voyagent en diverses régions du ciel, tantôt isolés, tantôt réunis en essaims dont le retour a lieu à des époques régulières. L'existence nous en est révélée par la rencontre qu'en fait notre globe de temps à autre : la Terre côtoie alors de véritables bancs de matière cosmique; ceux des corpuscules qui frôlent et traversent l'atmosphère, s'y enflamment, et quelquefois même tombent sur le sol : ce sont les *étoiles filantes*, les *bolides* et les *aérolithes*.

Enfin, un immense anneau lumineux, de forme lenticulaire, et qui est composé probablement de milliards de météores pareils à ceux dont nous venons de parler, entoure le Soleil en s'étendant à une distance considérable de la Terre; nous voyons à certaines époques de l'année cet anneau s'élever au-dessus de l'horizon, après le coucher ou avant le lever du Soleil, comme un cône lumineux ayant cet astre à sa base : c'est la *lumière zodiacale*.

Telle est l'énumération des astres et des agrégations corpusculaires qui composent le Monde solaire.

L'étude de ce Système a pour nous un intérêt immense. C'est notre grande patrie dans cet infini qu'on nomme l'Univers. Le globe que nous habitons est un des membres de la famille planétaire; et, bien qu'il soit un grain de sable dans un ensemble qui lui-même est un point perdu dans l'immensité, qui ne comprend que c'est lui que nous devons connaître avant tout; que c'est le seul d'ailleurs que nous puissions connaître de science profonde; et que c'est seulement en comparant les planètes à notre planète que nous parviendrons à nous former quelque idée de la constitution de ces terres célestes, dont notre Terre restera toujours séparée par des abîmes?

De même, le Monde solaire n'est qu'une unité parmi les millions de mondes dont nous voyons briller les étoiles centrales dans le ciel de nos nuits; peut-être n'est-ce ni un des plus importants, ni un des plus riches, ni un des plus considérables par ses dimensions. Mais c'est le seul aussi qu'il nous soit donné de connaître en détail; c'est le seul où nous ayons pu mesurer avec précision les mouvements des corps qui le composent, de façon à pénétrer le secret des lois mécaniques et physiques qui les gouvernent, et, par là, les lois les plus générales du mécanisme universel. Par delà le monde solaire, grâce au télescope et à des méthodes d'analyse aussi ingénieuses qu'imprévues, on a pu sans doute plonger par la vue et par la pensée à des distances qui effrayent l'imagination; on a pu constater des mouvements qui demandent des siècles pour devenir sensibles, déterminer la nature des étoiles, la composition chimique des substances dont l'incandescence produit leur lumière. Mais n'oublions pas que, si le monde sidéral est le domaine des plus hardies conceptions que l'homme ait pu former sur la structure de l'Univers, c'est aussi celui des conjectures et des hypothèses. Or, ces hypothèses et ces

conjectures n'ont d'autre fondement solide que les inductions et les analogies tirées des connaissances précises, recueillies pendant deux mille ans sur notre système : l'astronomie sidérale, en un mot, eût été impossible sans l'astronomie planétaire.

Voilà pourquoi c'est le Soleil, ce sont les planètes et les autres astres circulant autour de lui, c'est le Monde solaire que nous devons étudier tout d'abord. Avant de nous élancer dans les profondeurs infinies du ciel, commençons donc par visiter en détail les régions célestes où, en réalité, nous nous mouvons nous-mêmes. Du Soleil à Neptune et aux points de l'espace où s'enfoncent les comètes périodiques, le champ est assez vaste pour une première étape.

LIVRE PREMIER

LE SOLEIL

De tous les astres qui peuplent l'immensité de l'espace, le Soleil est le plus intéressant pour les habitants de la Terre, et il est de toute évidence qu'il en doit être ainsi pour tous les êtres qui vivent à la surface des autres planètes.

Centre des mouvements de tous les corps célestes du système, il exerce sur chacun d'eux par sa masse une influence dominante; il les maintient dans des orbites de forme et de dimensions presque invariables; il est pour tous le foyer pour ainsi dire inépuisable de la lumière, de la chaleur, et par conséquent de la vie. C'est en lui que toutes les énergies, mécaniques et chimiques, périodiquement développées à la surface de la Terre et à la surface des autres globes planétaires, puisent incessamment comme à une source intarissable de puissance; et cependant elles n'en absorbent à chaque instant qu'une insignifiante fraction. Les vibrations si prodigieusement rapides de l'immense sphère, franchissant l'espace céleste, le milieu éthéré, avec une vitesse foudroyante, vont, partout où elles pénètrent, provoquer dans les corps des phénomènes de mouvement dont les formes variées constituent, tantôt la lumière, tantôt la chaleur, tantôt les affini-

tés chimiques, tantôt enfin les courants électriques et magnétiques.

Quelle est l'origine de cette puissance dont l'activité confond notre imagination et notre pensée? Comment s'alimente ce foyer qui rayonne certainement depuis des millions de siècles? D'après quelles lois le Soleil, père commun de toute cette famille d'astres circulant autour de lui, les retient-il sous sa domination? Ces questions sont dès maintenant posées, et si la science ne les a point encore toutes résolues, du moins elle a réussi à en formuler nettement l'énoncé; déjà, elle a établi quelques principes qui seront un jour les fondements de la dynamique de l'univers. Sur la forme, la distance, les dimensions du Soleil, l'astronomie a aujourd'hui des données positives; elle a déterminé ses mouvements de rotation et de translation dans l'espace; elle a rassemblé enfin, et recueille encore tous les jours, sur sa constitution physique et chimique, sur les phénomènes qui se passent à sa surface, une série nombreuse de faits du plus haut intérêt. C'est à la description de ces faits que nous allons consacrer ce premier Livre.

Plus loin nous verrons quelle figure le Soleil fait dans l'univers sidéral, et nous le retrouverons parmi les millions d'étoiles de la Voie Lactée. Remontant dans l'histoire ancienne du ciel, nous essayerons alors de montrer, avec Laplace, comment ont pu jaillir de son sein, à des époques immensément éloignées de la nôtre, ces agglomérations de matière qui, d'abord sous forme d'anneaux nébuleux, sont devenues à la longue, par une concentration naturelle, des globes à peu près sphériques : Jupiter, Saturne, Mars, la Terre, Vénus, toutes les planètes et tous leurs satellites, qui se trouvent être ainsi autant d'enfants du Soleil.

I

FORME, DISTANCE ET DIMENSIONS DU SOLEIL.

§ 1. LE SOLEIL VU A L'ŒIL NU. — FORME DU DISQUE SOLAIRE.

Il n'est besoin de lunettes ni de télescopes pour constater les mouvements apparents du Soleil. Tous les jours, il se lève à l'orient, monte plus ou moins haut au-dessus de l'horizon, en décrivant, selon l'époque de l'année ou selon la position géographique du lieu de l'observation, un arc plus ou moins étendu; puis il va se coucher ou disparaître au-dessous de l'horizon occidental. C'est là le *mouvement diurne*, auquel participent tous les astres, Lune, planètes, étoiles : on sait qu'il est dû au mouvement réel de rotation du globe terrestre autour de son axe polaire.

Outre ce premier mouvement apparent, le Soleil en a un second, qui le fait correspondre d'un jour à l'autre à des régions du ciel différentes, à des étoiles de plus en plus orientales. Il semble, en un mot, rétrograder chaque jour sur son arc diurne; et, en une année, il parcourt ainsi toute la circonférence d'un grand cercle du ciel. De là, les inégalités variables des jours et des nuits, soit en un même lieu de la Terre, soit en des latitudes différentes; de là, nos saisons. Mais ce second mouvement du Soleil, comme le premier, n'est qu'une

apparence, due au mouvement vrai de la Terre, à l'orbite réelle qu'elle décrit autour du Soleil, dans l'intervalle d'une année. De semblables mouvements pourraient s'observer de la surface de Mars, de Jupiter, de Vénus, si nous habitions ces globes. En réalité, c'est l'astre radieux qui est immobile; c'est la Terre et ce sont les planètes qui se meuvent; c'est donc en décrivant les planètes que nous devrons étudier les mouvements dont il vient d'être question et les conséquences qui en dérivent. Mais n'oublions pas que l'immobilité du Soleil est toute relative : il se meut d'abord sur lui-même comme les planètes, en tournant autour d'un de ses diamètres; il a, comme elles, un mouvement de translation dans l'espace; mais dans ce voyage de navigation sidérale, il emmène avec lui, comme un seigneur et maître, tout un cortége d'astres, les planètes avec leurs satellites et les comètes.

Observer le Soleil à l'œil nu, quand il est haut sur l'horizon et que le ciel est pur, n'est pas chose facile, tout le monde le sait par expérience. Sa lumière éblouissante blesse la vue, sans permettre de juger de la forme ni des dimensions apparentes de l'astre. Pour éviter ce danger, il faut profiter du moment où le Soleil vient de se lever ou encore de celui qui précède son coucher. Alors, pour peu que l'atmosphère soit brumeuse, la lumière solaire est assez affaiblie pour rendre l'observation facile. Le disque du Soleil se montre, en ce cas, sensiblement elliptique, surtout dans la moitié inférieure de son contour. La figure 1 peut donner une idée de cette apparence.

Mais ce n'est point là la forme vraie du disque solaire. Près de l'horizon, la réfraction[1], due aux couches d'air que la lumière doit traverser avant d'arriver à l'œil, varie rapidement d'intensité suivant la hauteur. Les différents points du contour

1. Voir, à ce sujet, le chapitre qui traite de la Réfraction dans notre ouvrage LES PHÉNOMÈNES DE LA PHYSIQUE, p. 302 de la 2e édition.

du Soleil sont inégalement relevés, sans que changent les dimensions du diamètre horizontal de l'astre : de là, la forme elliptique des deux moitiés du disque, forme plus prononcée pour la moitié inférieure que pour la moitié supérieure. Parfois même, il y a dans les couches inférieures de l'air un mélange si irrégulier de vapeurs plus ou moins denses, que la réfraction qui en résulte donne au contour du Soleil les appa-



Fig. 1. Forme elliptique du disque du Soleil à l'horizon.

rences les plus bizarres. Telles sont les formes que représente la figure 2, où l'on voit l'astre, après son lever ou avant son coucher, au-dessus de l'horizon maritime.

On se fait, à l'œil nu, une idée plus nette de la forme du disque solaire quand on peut l'apercevoir, à une certaine hauteur au-dessus de l'horizon, voilé par des nuages ou des brouillards un peu intenses, ou quand on le regarde au travers d'un verre terni par du noir de fumée; mais mieux vaut en-

core employer une lunette ou un télescope, pourvu qu'on prenne l'indispensable précaution de munir l'oculaire d'un verre coloré, bleu foncé ou noir[1]. Une première appréciation, nécessairement grossière, permet alors aisément de reconnaître que le disque du Soleil est circulaire. Mais l'emploi des instruments de précision ne laisse à cet égard aucun

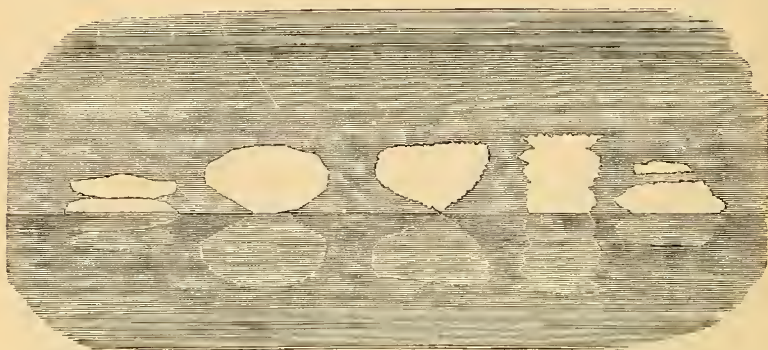


Fig. 2. Formes singulières du disque du Soleil à l'horizon de la mer; d'après les observations faites à Dunkerque par Biot et Mathieu.

doute, et de nombreuses mesures micrométriques[2] ont prouvé que tous les diamètres du disque ont même grandeur apparente. Le Soleil a donc la forme d'un cercle lumineux par-

1. On pourrait encore, ainsi qu'on le fait depuis quelques années, employer une lunette spéciale dont l'objectif est recouvert d'une couche d'argent assez mince pour laisser passer une suffisante portion des rayons lumineux. On peut enfin observer le Soleil en projetant sur un écran placé en avant de l'oculaire, l'image donnée par la lunette. Les premiers astronomes qui ont observé le Soleil avec des lunettes ne connaissaient point l'usage des verres de couleur : ils observaient l'astre à l'horizon ou au travers des nuages et des brouillards. Même avec les précautions dont nous parlons plus haut, l'étude assidue du Soleil devient à la longue dangereuse pour la vue. Galilée et Cassini sont morts aveugles. A l'intensité lumineuse se joint l'intensité de la chaleur, si grande au foyer des télescopes, quand on applique ces instruments à l'observation du Soleil, qu'on est obligé d'avoir un grand nombre de verres de couleur de rechange; la chaleur les fait éclater.

2. C'est-à-dire faites avec des *micromètres*, appareils qui s'adaptent aux lunettes et servent à évaluer de très-petites dimensions, de très-petits angles. — On nomme particulièrement *héliomètre* l'appareil de ce genre qui sert à

fait, et comme il n'est pas moins certain que le Soleil tourne autour d'un axe, et dès lors nous présente successivement des faces diverses, on a dû en conclure que sa forme est en réalité celle d'une sphère, sans qu'on ait pu constater, dans aucun des points de sa circonférence, une trace quelconque de déformation ou d'aplatissement.

Quand le Soleil se lève ou se couche, son disque paraît ordinairement plus gros qu'à des hauteurs plus grandes au-dessus de l'horizon. A midi, heure où cette élévation est maximum, le disque semble avoir des dimensions beaucoup moindres que le matin ou le soir. Ce n'est là qu'une illusion, qui se produit aussi pour la Lune, pour les constellations ou groupes d'étoiles, et dont la cause est principalement dans l'habitude que nous avons acquise d'apprécier les dimensions et les distances. Mesuré à l'aide de procédés rigoureux, et dans le cours de la même journée, et déduction faite des effets de la réfraction, le diamètre du Soleil reste parfaitement égal à lui-même, à l'horizon et à des hauteurs quelconques, comme au moment de sa culmination ou hauteur méridienne, alors même que celle-ci atteint le zénith.

§ 2. DIMENSIONS APPARENTES DU SOLEIL, VU DE LA TERRE ET DES PLANÈTES.

Le Soleil a les mêmes dimensions apparentes, ou peu s'en faut, que la Lune : les deux disques occupent, à peu de chose près, la même surface sur la voûte du ciel. Le diamètre du Soleil, cependant, est en moyenne un peu plus grand. Il varie dans le cours de l'année comme celui de la Lune varie dans le cours de la lunaison, et la raison de ces variations est, dans

mesurer le diamètre solaire, mais on emploie également l'héliomètre à la mesure de toute autre distance apparente, celle, par exemple, des deux composantes d'une étoile double.

les deux cas, la même : elle vient de ce que la Terre est tantôt plus rapprochée, tantôt plus éloignée de l'un ou de l'autre des deux astres. Ces variations sont manifestes dans les éclipses de Soleil, qui, tantôt sont totales, tantôt sont seulement annulaires.

Quand la Terre est à sa plus petite distance du Soleil, — ce qu'on exprime en disant qu'elle est à son *périhélie*[1], — le diamètre apparent du disque solaire est le plus grand possible : il atteint alors environ 32′ 36″[2]. C'est vers le 1er janvier que cette circonstance se présente. Vers le 1er juillet, au contraire, la Terre est à son *aphélie*, à son plus grand éloignement du Soleil; le diamètre apparent du disque solaire est alors le plus petit possible : environ 31′ 31″. Enfin, dans les premiers jours d'avril et d'octobre, à l'époque de la moyenne distance des deux

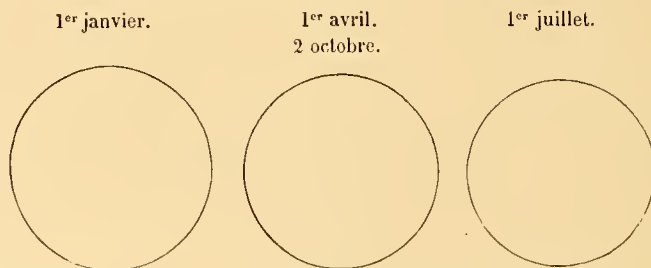


Fig. 3. Dimensions apparentes du disque solaire, aux époques de ses distances extrêmes et moyenne à la Terre.

astres, le diamètre apparent est de 32′ 4″ environ[3], moyenne de ses dimensions extrêmes. La figure 3 donne les dimensions

1. De περι, *près de*, et ηλιος, *Soleil;* aphélie, de απο, *loin de*, etc.

2. Il est d'usage, en géométrie, de diviser la circonférence du cercle en 360 parties égales, dont chacune se nomme un degré et se représente ainsi : 1°. Chaque degré se subdivise en 60 minutes, et chaque minute en 60 secondes. Une minute s'écrit : 1′; et une seconde : 1″. Je donne ces détails pour ceux de mes lecteurs qui ne sont point familiers avec les termes de géométrie, parce qu'il m'arrivera souvent de parler de secondes, de minutes, de degrés dans le cours d'une description.

3. D'après les observations faites à l'Observatoire de Greenwich, de 1836

comparées du disque à ces diverses époques; bien que leurs différences soient assez sensibles sur le papier, elles eussent évidemment, dans le ciel, passé inaperçues sans le secours de mesures rigoureuses.

La circonférence de l'horizon ou de tout autre grand cercle de la voûte céleste serait entièrement remplie par 673 disques de même dimension que celui du Soleil à sa moyenne distance, si tous ces disques étaient tangents les uns aux autres tout le long de la circonférence. Il en faudrait 685 à l'époque de l'aphélie, et 662 seulement au périhélie.

Les dimensions apparentes d'un objet varient avec la distance : ainsi doivent varier les dimensions du disque solaire, vu de chacune des planètes du système. Il doit paraître d'autant plus petit que la planète en est plus éloignée. Pour mieux faire saisir la signification des nombres suivants que le lecteur aurait peut-être peine à se représenter, nous avons joint au tableau qui les donne une gravure montrant les dimensions comparées du Soleil, vu de chacune des principales planètes, à leurs moyennes distances. Mais il ne faut pas oublier que si la grandeur apparente varie, l'intensité intrinsèque de l'éclat lumineux reste la même, abstraction faite, bien entendu, de l'absorption due aux atmosphères de chaque corps céleste, et sur l'intensité de laquelle on n'a encore aucune donnée précise. L'intensité intrinsèque de la lumière ou de la chaleur

à 1847 (V. la *Connaissance des temps* pour 1876), le demi-diamètre du Soleil à sa distance moyenne de la Terre est égal à 16′ 1″,82. Soit pour le diamètre 32′3″,64. — En représentant par 10 000 la surface lumineuse ou calorifique du Soleil à sa distance moyenne à la Terre, on trouve les nombres 9663 et 10 335 pour cette même surface, telle qu'elle nous apparaît à sa plus grande distance en juillet, et à son plus petit éloignement vers le 1er janvier. Les mêmes nombres nous donnent donc les quantités relatives de chaleur et de lumière reçues par la Terre à ces différentes époques, de sorte qu'en été (l'été de l'hémisphère septentrional) le Soleil échauffe et éclaire moins notre globe que pendant l'hiver. Cette apparente anomalie sera expliquée plus loin, quand nous aurons à nous occuper des saisons terrestres.

reçue par une planète est donc seulement en rapport avec l'étendue de la surface apparente du disque solaire; mais pour

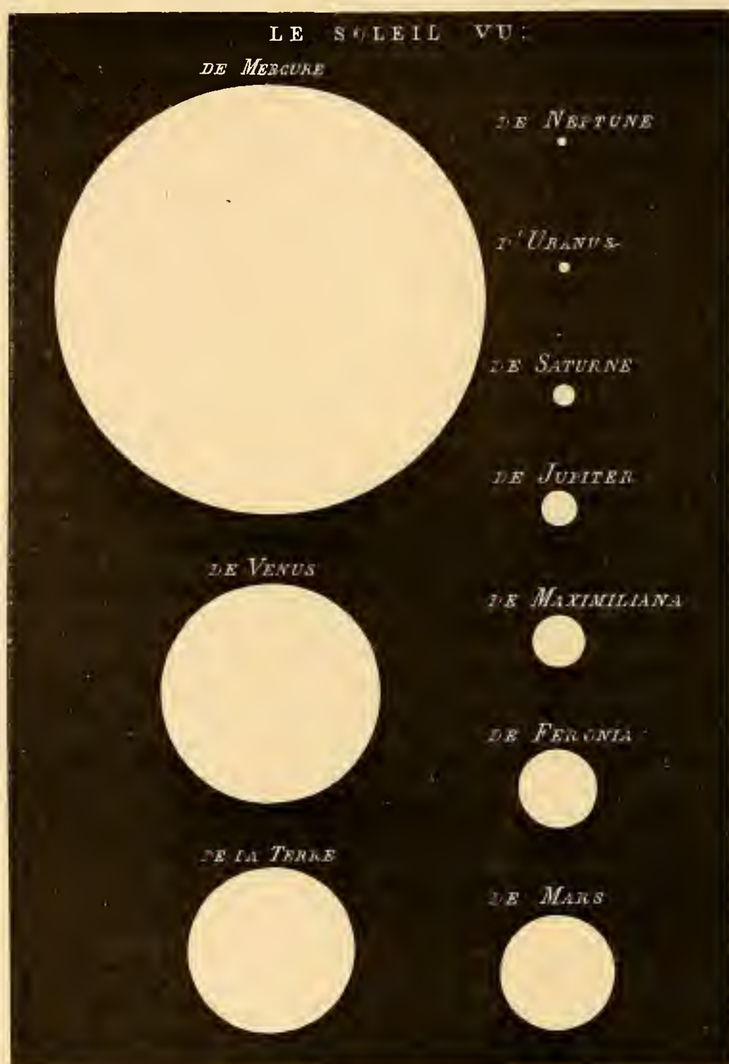


Fig. 4. Le Soleil vu des principales planètes; dimensions apparentes comparées.

juger de la quantité totale de la radiation solaire sur chaque globe, il faudrait tenir compte à la fois de sa distance au Soleil et de l'étendue de l'hémisphère éclairé.

DIMENSIONS APPARENTES DU SOLEIL VU DES PLANÈTES.

	Diamètre.	Surface.
De Mercure.	82′ 49″	6673
— Vénus.	44′ 20″	1910
— La Terre	32′ 4″	1000
— Mars	21′ 3″	430
— Flore	14′ 33″	206
— Camilla ou Maximiliana .	9′ 0″	79
— Jupiter	6′ 10″	37
— Saturne.	3′ 22″	11
— Uranus	1′ 40″	3
— Neptune.	1′ 4″	1

De Mercure, la planète la plus voisine du Soleil, on voit cet astre sous ses dimensions apparentes les plus grandes; de Neptune, au contraire, sous ses plus petites. La surface lumineuse est 6673 fois plus considérable pour la première de ces planètes que pour la seconde, située, comme on sait, aux confins de notre système. En étudiant la constitution physique des planètes, nous reviendrons sur les quantités de lumière et de chaleur dont les effluves solaires baignent leurs surfaces. Disons seulement que si, pour les habitants de la Terre, le disque du Soleil offre une surface apparente sept fois plus petite que celle sous laquelle on l'aperçoit de Mercure, si dans Neptune cette surface se trouve réduite jusqu'au millième, elle conserve néanmoins, dans ce dernier globe, un éclat bien supérieur à celui de tous les astres, planètes ou étoiles que nous voyons au ciel[1]. Mais ce serait autre chose, si nous nous éloignions du Soleil jusqu'à la sphère des étoiles, même des plus rapprochées de nous. A cette distance énorme, l'immense luminaire ne paraîtrait plus que comme un point, perdu parmi les innombrables feux de la voûte étoilée[2].

1. De Neptune, le diamètre du Soleil est vu sous un angle d'environ 64″, c'est-à-dire environ trois fois plus petit que l'angle sous lequel nous voyons la planète Jupiter à sa moyenne distance. Mais l'éclat de sa lumière est incomparablement plus intense.

2. On verra, en effet, plus loin, que le diamètre des plus brillantes étoiles,

§ 3. DISTANCE DU SOLEIL A LA TERRE. — PARALLAXE DU SOLEIL.

La mesure des dimensions apparentes du disque du Soleil est un élément qui a été d'une grande importance pour l'astronomie : ces dimensions variant d'une manière continue d'un jour à l'autre, ont permis de comparer entre elles les distances où la Terre se trouve de l'astre radieux à chaque jour de l'année, et ont donné ainsi une idée exacte de la forme de son orbite[1]. Mais elles ne peuvent suffire à faire reconnaître les dimensions réelles de cette orbite, non plus que celles du Soleil, tant qu'on ignore la distance vraie de l'astre, sa distance exprimée par exemple en rayons de l'équateur de la Terre.

Voici donc la question qui se pose maintenant, si nous voulons nous faire une idée précise de la grosseur du Soleil, et des éléments physiques qui sont en rapport avec cette dimension, si nous voulons avoir une unité propre à mesurer l'étendue du monde solaire tout entier. et plus tard, celle de l'univers visible : « Quelle est la distance moyenne du Soleil à la Terre ; quel est le rayon moyen de l'orbite que notre planète décrit en une année autour de lui? » Les astronomes disent, en des termes équivalents : « Quelle est la *parallaxe* du Soleil ? »

Voyons d'abord ce qu'on entend par ce dernier mot. Sup-

de Sirius même, n'est pas égale à 1 centième de seconde. Le Soleil vu de Neptune, ayant encore 64″, la surface de son disque est supérieure à 40 960 000 fois celle de Sirius. Ainsi, dans la planète la plus reculée du système, en supposant aux deux lumières le même éclat intrinsèque, le Soleil illumine encore comme plus de 40 millions d'étoiles de première grandeur. Le jour sur Neptune est 800 fois aussi brillant que notre pleine Lune.

1. Deux éléments sont nécessaires pour la solution de ce problème, laquelle a été donnée pour la première fois par le grand Képler : 1° le mouvement angulaire du Soleil qui varie d'un jour à l'autre pendant une année; 2° les variations de son diamètre apparent, qui correspondent aux variations de sa distance à la Terre. (V. Biot, *Astronomie physique*, t. IV, ch. IX.)

posons un observateur au centre même du Soleil, et, de là, observant le globe terrestre. Sous quel angle verra-t-il le rayon de la Terre ? Si cette question était résolue, si l'on savait le nombre de secondes d'arc qui mesure l'angle dont il s'agit, la distance même de la Terre au Soleil en serait une conséquence, ainsi que nous le ferons comprendre dans la Troisième partie du Ciel (voyez le chapitre consacré à la mesure des distances célestes). Or, c'est cet angle-là qu'on nomme en style astronomique la *parallaxe du Soleil*.

La première détermination un peu précise de cet élément date du siècle dernier : elle a été déduite des observations d'un phénomène astronomique assez rare, le passage de la planète Vénus au devant du disque du Soleil. On l'a obtenue depuis par diverses méthodes, et les astronomes ont attendu avec impatience l'année 1874, où le même phénomène s'est reproduit à la date du 8 décembre, pour se prononcer entre les résultats, encore bien divergents, que ces méthodes ont fournis[1]. Au moment où nous écrivons (février 1876), la discussion des observations n'est pas terminée, et le seul résultat livré à la publicité donne 8″,88 pour la parallaxe solaire. C'est,

1. Voici quelques-uns des résultats auxquels nous faisons allusion :

Bessel avait trouvé, par la discussion des observations des passages de Vénus du siècle dernier, la parallaxe solaire égale à. . . .	8″58
Polawski, même méthode, par une discussion nouvelle. . . .	8″86
Winnecke, observations de Mars	8″96
Hansen, équation parallactique de la Lune.	8″92
Stone	8″93
Le Verrier, d'après les mouvements de Mars, de Vénus, de la Lune.	8″95
Foucault, d'après la détermination de la vitesse de la lumière.	8″86
Galle, d'après les observations de la planète Flore.	8″87
Cornu, vitesse de la lumière, détermination récente.	8″88
Puiseux, premiers résultats déduits du passage de Vénus, en décembre 1874	8″88

La moyenne des neuf derniers résultats, — tout le monde est d'accord que la première est trop faible, — est le nombre 8″,90.

à peu de chose près, le nombre que nous avions adopté dans les précédentes éditions du CIEL. L'*Annuaire du Bureau des Longitudes* pour 1876 donne encore 8″,86 pour cet élément : c'est la valeur que nous conservons provisoirement.

Le rayon de l'équateur de la Terre, vu de face à la distance du Soleil, aurait donc 8″,86 de dimension apparente. Dès lors, le globe terrestre vu du Soleil aurait un diamètre apparent double, ou de 17″,72, et un calcul simple permet d'en déduire pour la distance moyenne du Soleil à la Terre :

23 245 rayons de l'équateur, c'est-à-dire 148 250 000 kilomètres.

Il y a loin du nombre que nous venons de transcrire à la distance adoptée hypothétiquement par des disciples de Pythagore, dont l'école professait d'ailleurs, sur le système du monde, des idées si rapprochées de celles qu'une longue suite de travaux a définitivement consacrées. Ils assignaient 18 000 lieues, au lieu de 37 millions, à la distance où nous sommes de l'astre qui nous échauffe et nous éclaire : c'était donner au Soleil à peu près 167 lieues de diamètre, et l'on comprend alors cette comparaison qui étonnait les anciens, qui peut-être étonnerait encore beaucoup de gens parmi nous, à savoir, que le Soleil est plus gros que le Péloponèse[1].

148 250 000 kilomètres ou 37 millions de lieues en nombres ronds, telle est donc approximativement la distance du Soleil ; mais ces nombres représentent la distance moyenne, celle

1. Avant 1769, les astronomes avaient essayé de diverses façons de trouver la distance du Soleil. Ceux de l'antiquité avaient dû se borner à des conjectures.

Aristarque de Samos, et à sa suite Ptolémée, Copernic et Tycho, la supposaient égale à 1200 rayons de la Terre, près de 2 millions de lieues, c'est-à-dire vingt fois moindre que la vraie distance. Képler tripla ce nombre. Cassini et Lacaille furent ceux qui s'approchèrent le plus de la vérité. Selon d'Alembert (dans l'*Encyclopédie*), le dernier de ces savants évaluait la distance en question à 21 000 rayons terrestres, Cassini à 28 000. Le même auteur cite encore une distance de 12 000 diamètres de la Terre, c'est-à-dire

où la Terre se trouve de l'astre vers les premiers jours d'avril et d'octobre.

Voici maintenant les distances extrêmes :

Au périhélie, vers le 1er janvier.	145 700 000 kil.	ou 22855	rayons.
A l'aphélie, vers le 1er juillet. .	151 800 000 —	— 23630	—

Ce n'est pas tout que de donner des nombres, il faut tâcher de se figurer les grandeurs qu'ils représentent, et ce n'est pas toujours chose facile, l'accumulation des chiffres ne faisant souvent sur l'esprit qu'une impression très-vague. Notre imagination est rebelle à la représentation des grandes distances qu'on rencontre si fréquemment en astronomie; aussi, c'est seulement à l'aide de comparaisons que nous parvenons à nous en faire une idée un peu précise. Ces distances viennent-elles à dépasser le champ de notre vue sur un horizon terrestre, c'est-à-dire 10 à 20 lieues, l'image proprement dite s'évanouit, et nous sommes forcés d'avoir recours à d'autres procédés de représentation; par exemple, nous nous demandons combien il faudrait de temps pour parcourir la distance donnée, à un mobile animé d'une vitesse connue. La sensation de la durée vient alors en aide à celle de l'étendue, pour la compléter et la parfaire.

Voyons si, en usant de cet artifice, nous arriverons à embrasser avec quelque netteté l'espace qui sépare la Terre du Soleil.

Considérons la lumière, qui se propage en ligne droite, en parcourant uniformément 300 000 kilomètres par chaque seconde de temps. Du Soleil à la Terre, elle met 496 secondes

un peu plus forte que celle adoptée aujourd'hui; mais il ne donne pas le nom de l'astronome qui avait fourni cette évaluation. Arago, dans son *Astronomie populaire*, rappelle les mesures trouvées par Riccioli et Hévélius, 7000 et 5200 rayons terrestres; enfin celles de Richer et de Maraldi, déduites de l'opposition de Mars, et qui fixaient le Soleil à des distances moyennes de la Terre égales à 21 712 et à 20 626 rayons de notre planète.

16 centièmes de seconde ou $8^m 14^s,16$ à franchir l'intervalle moyen de 148 millions de kilomètres qui les sépare.

Un boulet de canon de 12 kilogrammes, chassé de l'arme par une charge de 6 kilogrammes de poudre, se meut avec une vitesse de 500 mètres dans la première seconde. S'il conservait cette vitesse uniforme jusqu'au Soleil, il lui faudrait environ 9 années $\frac{3}{4}$ pour y parvenir.

Si l'espace compris entre le Soleil et la Terre était susceptible de transmettre un son avec la vitesse uniforme de propagation de 340 mètres à la seconde, — c'est la vitesse dans l'air à 15°, — il faudrait à l'ébranlement sonore 13 ans $\frac{3}{4}$ pour franchir cette distance. Il y aurait donc à peu près 14 ans que l'explosion qui lui aurait donné naissance à la surface du Soleil aurait eu lieu, au moment où l'onde viendrait frapper notre oreille à la surface de la Terre.

Imaginons enfin un chemin de fer reliant en droite ligne notre planète et le Soleil; un train express et direct voyageant à la vitesse constante de 50 kilomètres par heure, sans s'arrêter jamais, n'arriverait à destination qu'après un voyage de 337 ans et demi. Parti au 1er janvier 1876, un tel convoi ne terminerait sa route que vers le mois de juin de l'année 2213.

Il y a des planètes plus rapprochées du Soleil que la Terre, mais il y en a aussi de beaucoup plus éloignées. Neptune, dont l'orbite marque les limites du monde planétaire, tel du moins que nous le connaissons aujourd'hui, est à une distance du Soleil qui dépasse trente fois celle de la Terre, et qui, dès lors, se mesure, en nombre rond, par 5 milliards 500 millions de kilomètres. La lumière ne franchit cet intervalle qu'en 4 heures 7 minutes; notre train express de chemin de fer, s'il était parti de Neptune il y a 10 124 ans, arriverait à peine aujourd'hui au Soleil !

§ 4. DIMENSIONS RÉELLES DU SOLEIL.

Pour que le Soleil, malgré sa prodigieuse distance, nous apparaisse sous la forme d'un disque ayant un aussi grand diamètre angulaire, il faut que ses dimensions vraies soient réellement énormes. Le globe solaire a, en effet, un diamètre qui n'est pas moindre de 108 fois le diamètre équatorial de la Terre. On peut se rendre compte très-facilement de cette proportion des deux astres : la parallaxe solaire, dont le double donne le diamètre apparent de notre planète vue du Soleil, étant de 8″,86, et le diamètre apparent moyen du Soleil vu de la Terre, c'est-à-dire de la même distance, étant 1923″,64, il suffit de diviser ce second nombre par 17″,82 pour connaître le rapport très-approché des diamètres réels. En faisant le calcul trigonométrique exact, on trouve : $D = 108,556$ d.

Si l'on passe maintenant aux dimensions du Soleil exprimées en kilomètres pour les longueurs, en kilomètres carrés pour les surfaces, en kilomètres cubes pour les volumes, voici ce qu'on trouve :

Le rayon du Soleil a 692 000 kilomètres, 173 000 lieues kilométriques environ; la circonférence d'un de ses grands cercles mesure 4 350 000 kilomètres, ou 1 087 500 lieues kilométriques. C'est toujours, comme on voit, 108 fois et demie les dimensions correspondantes de la Terre[1].

1. Comme nous aurons bientôt l'occasion d'évaluer les dimensions réelles d'objets observés sur le disque solaire ou près de sa surface, il est bon dès maintenant de donner le tableau des dimensions kilométriques des divisions de l'échelle adoptée. Les astronomes mesurent ces objets en minutes et en secondes. Or, le diamètre du Soleil à sa moyenne distance, comprend 1923″,64, et mesure en réalité, on l'a vu plus haut, 1 384 000 kilomètres. Ainsi 1″ à la surface du Soleil vaut $\frac{1\,384\,000}{1923{,}64} = 719^{k},5$, d'où résulte la valeur d'une minute, qui est 43 170 kilomètres. Quand nous parlerons de minutes et de se-

La surface totale de l'astre, celle de l'enveloppe lumineuse dont les contours limitent pour nous le disque du Soleil, n'est guère inférieure à 12000 fois la surface de notre Terre (11785); ou, si l'on veut, est égale en nombre rond à six millions de millions de kilomètres carrés.

Son volume évalué en kilomètres cubes se mesure par le nombre 1 390 050 000 000 000 000.

Pour se faire une idée de ce qu'un tel nombre représente, il faut le rapporter au volume même de la Terre, qui vaut déjà plus de mille milliards de kilomètres cubes. On trouve ainsi que le globe du Soleil vaut à lui seul, en volume, autant que 1 279000 globes terrestres. La Terre, il est vrai, n'est pas, tant s'en faut, la planète la plus volumineuse, puisque Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune sont respectivement 1390,

condes d'arc sur le Soleil, il faudra donc se reporter au tableau suivant qui servira à les traduire en dimensions kilométriques.

		kil.			kil.
1″	vaut	719.5	1′	vaut	43170
2″	—	1439.0	2′	—	86340
3″	—	2158.5	3′	—	129510
4″	—	2878.0	4′	—	172680
5″	—	3597.5	5′	—	215850
6″	—	4317.0	6′	—	259020
7″	—	5036.5	7′	—	302190
8″	—	5756.0	8′	—	345360
9″	—	6475.5	9′	—	388530
10″	—	7195.0	10′	—	431700

Sur le Soleil, le fil d'araignée d'un micromètre couvre par son épaisseur environ 240 kilomètres.

Mais il ne faut pas confondre, comme des astronomes l'ont fait quelquefois, les minutes et secondes d'arc mesurées de la Terre, comme ci-dessus, avec les minutes et secondes héliocentriques, c'est-à-dire comptées du centre du Soleil. Un degré du limbe solaire ne vaut que 16″,8 ou 12087^{k}, c'est-à-dire la 360me partie de la circonférence du Soleil; une seconde héliocentrique n'est plus que $3^{k}360$ mètres.

Enfin, si les objets mesurés ne sont pas au centre du disque solaire ou sur son contour, il faut évidemment tenir compte du raccourcissement dû à la perspective, c'est-à-dire de l'effet de la courbure de la surface.

865, 75 et 85 fois aussi grosses qu'elle. Mais réunît-on toutes les planètes et leurs satellites, on trouverait encore que le volume du Soleil équivaut à 600 fois au moins le volume résultant de cette agglomération. La Lune est éloignée de nous de 60 rayons de la Terre environ. Eh bien, si l'on supposait que le centre du Soleil vînt à coïncider avec celui de notre globe, non-seulement toute l'orbite lunaire resterait à l'intérieur de l'immense sphère solaire, mais il faudrait en outre s'élever

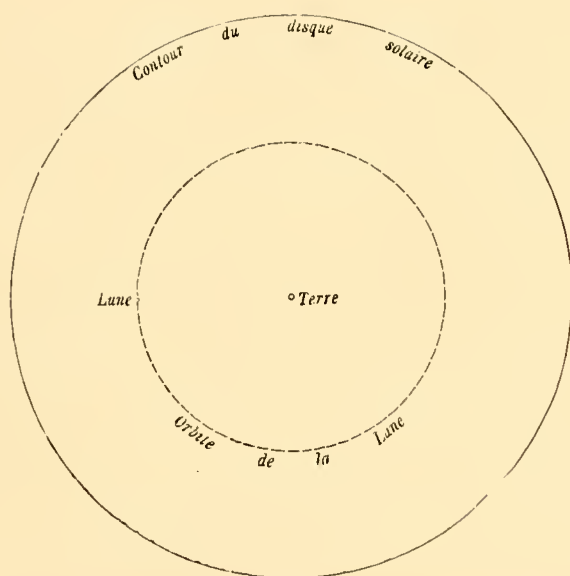


Fig. 5. Dimensions comparées du globe du Soleil et de l'orbite de la Lune.

au delà de cette orbite de 48 rayons terrestres, pour atteindre seulement la surface extérieure de l'astre lumineux. C'est ce que montre la figure 5.

Arago, dans le tome quatrième de son *Astronomie populaire*, cite la comparaison familière suivante, bien propre à fournir une image de l'immensité du volume solaire : « Un professeur d'Angers voulant, dit-il, donner à ses élèves une idée sensible de la grandeur de la Terre comparée à celle du Soleil, imagina de compter le nombre de grains de blé de grandeur moyenne

qui sont contenus dans la mesure de capacité nommée le litre : il en trouva 10 000. Conséquemment, un décalitre doit en renfermer 100 000, un hectolitre 1 000 000, et 14 décalitres 1 400 000. Ayant alors rassemblé en un tas les 14 décalitres de blé, il mit en regard un seul de ces grains, et dit à ses auditeurs : « Voilà en volume la Terre, et voici le Soleil. » Cette assimilation frappa les élèves de surprise infiniment plus que ne l'avait fait l'énonciation du rapport des nombres abstraits 1 et 1 400 000[1]. »

Quand nous aurons vu quelles sont les dimensions absolues de ce grain de blé qui figurait la Terre, nous serons bien plus surpris encore, et notre imagination restera comme écrasée sous les prodigieuses dimensions du flambeau de notre monde, lequel toutefois n'est lui-même qu'un des grains de la poussière lumineuse répandue dans l'espace infini.

Notre Terre n'étant qu'un des membres de la famille planétaire, il serait naturel d'étendre les comparaisons que nous venons de faire entre son volume et celui du Soleil, aux corps célestes principaux qui circulent avec elle autour du foyer central. Mais plus loin, dans la description détaillée que nous ferons de chacun de ces corps, nous aurons l'occasion de nous étendre davantage sur leurs dimensions propres : nous donnerons alors des nombres précis. Contentons-nous de figurer approximativement leurs grosseurs relatives et leurs distances.

Représentons-nous le Soleil comme une sphère de 1 *décimètre* de diamètre ; la Terre sera un grain de moins de 1 *millimètre*, qu'il faudra reculer à la distance moyenne de $10^m,690$ pour mettre sa distance au Soleil en harmonie avec ses dimen-

1. Le nombre 1 400 000 représente ici le volume du Soleil comparé à celui de la Terre, dans l'hypothèse d'une parallaxe égale seulement à 8″,58. La parallaxe 8″,86 que nous avons adoptée réduit la distance du Soleil, et par conséquent ses dimensions. Il faut alors substituer, nous venons de le voir, le nombre 1 279 000 à 1 400 000, ce qui n'ôte rien du reste à la valeur de la comparaison imaginée par le professeur que cite Arago.

sions. Si la Terre avait, comme les globes géographiques de dimensions moyennes, 30 centimètres de diamètre, c'est à près de 3 kilomètres et demi (3490^{m}) qu'il faudrait l'éloigner du globe solaire, et celui-ci n'aurait pas alors moins de 32^{m},57 de diamètre. En un mot, imaginez un ballon sphérique assez volumineux pour s'élever au-dessus du sol à la moitié de la hauteur des tours Notre-Dame à Paris : c'est le Soleil. Placez un autre globe de 3 décimètres de diamètre à une distance de 3490 mètres : ce globe figurera la Terre.

Enfin, terminons par une comparaison qui mettra en parallèle les grosseurs et les distances. Du Soleil à la Terre, il y a, en moyenne, avons-nous vu, 23 200 rayons équatoriaux; il faudrait donc ranger à la file 11 600 globes terrestres pour aboutir au Soleil; tandis que 107 globes solaires suffiraient à combler l'intervalle.

On comprend mieux l'importance du rôle qu'un astre comme le Soleil joue dans le monde de corps célestes gravitant autour de lui, quand on se représente dans des proportions exactes les dimensions vraies et les valeurs relatives justes des grosseurs et des distances de tous ces corps. Voilà pourquoi j'ai insisté sur ces comparaisons familières, pourquoi j'ai cru bon de multiplier les images propres à donner à nos sens et par suite à notre esprit l'idée précise de tels rapports.

II

MOUVEMENT DE ROTATION DU SOLEIL.

§ 1. DÉCOUVERTE DE LA ROTATION DU SOLEIL. — SENS DE LA ROTATION.

Le globe du Soleil tourne autour d'un de ses diamètres, d'un mouvement uniforme, en un temps qui est à peu de chose près de vingt-cinq jours et demi.

La découverte de ce fait, d'une si haute importance pour l'astronomie, remonte aux premières années du dix-septième siècle, à l'époque où l'on put observer la surface du Soleil avec les lunettes récemment inventées : c'est à l'astronome hollandais Jean Fabricius qu'elle est incontestablement due, et qu'en revient tout l'honneur, comme le prouve le mémoire qu'il publia en juin 1611. Mais Giordano Bruno [1] et Képler avaient soupçonné le mouvement de rotation ; et Galilée, qui découvrit de son côté les taches du Soleil la même année que Fabricius, ne tarda point à arriver à la même conclusion que le savant hollandais [2]. Voici quelles furent les circonstances de cette grande découverte astronomique.

1. Il est assez remarquable, dit Humboldt (*Cosmos*, III), que Giordano Bruno, qui monta sur le bûcher huit ans avant l'invention du télescope et onze ans avant la découverte des taches solaires, crut à la rotation du Soleil autour de son axe.

2. M. John Williams, le regretté secrétaire de la Société astronomique de

Fabricius, examinant un jour avec une lunette le disque du Soleil, vit avec surprise à sa surface une tache noirâtre d'assez grande dimension qu'il prit d'abord pour un nuage. Un examen plus attentif lui prouva qu'il se trompait, mais l'élévation de plus en plus grande du Soleil et l'éclat éblouissant de l'astre (on ne se servait point encore de verres noirs pour l'observation) le forcèrent à remettre au lendemain matin l'étude de ce phénomène singulier. « Mon père et moi, dit-il, nous passâmes le reste de la journée et de la nuit suivante avec une extrême impatience, et en rêvant ce que pouvait être cette *tache;* si elle est dans le Soleil, disais-je, je la reverrai sans doute; si elle n'est pas dans le Soleil, son mouvement nous la rendra invisible; enfin, je la revis dès le matin avec un plaisir incroyable; mais elle avait un peu changé de place, ce qui augmenta notre incertitude; cependant nous imaginâmes de recevoir les rayons du Soleil par un petit trou dans une chambre obscure et sur un papier blanc, et nous y vîmes très-bien cette *tache* en forme de nuage allongé : le mauvais temps nous empêcha de continuer ces observations pendant trois jours. Au bout de ce temps-là nous vîmes la *tache* qui était avancée obliquement vers l'occident. Nous en aperçûmes une autre plus petite vers le bord du Soleil; celle-ci, dans l'espace de peu de jours, parvint jusqu'au milieu. Enfin, il en survint une troisième; la première disparut d'abord, et les autres quelques jours après. Je flottais entre l'espérance et la crainte de ne pas les revoir; mais, dix jours après, la première reparut à l'orient. Je compris alors qu'elle faisait une révolution, et depuis le commencement de l'année, je me suis

Londres, a relevé, en 1873, 45 observations chinoises de taches du Soleil, vues à l'œil nu, entre les années 301 et 1205 de notre ère, et mentionnées dans la grande Encyclopédie de Ma Twan Lin. Ainsi, les Chinois connaissaient, quatre siècles avant les Européens, l'existence des taches du Soleil. Il ne paraît pas du reste qu'ils en aient tiré aucun profit pour leur science, et la rotation du Soleil leur est demeurée inconnue.

confirmé dans cette idée, et j'ai fait voir ces *taches* à d'autres, qui en sont persuadés comme moi. Cependant j'avais un doute qui m'empêcha d'abord d'écrire à ce sujet, et qui me faisait même repentir du temps que j'avais employé à ces observations. Je voyais que ces *taches* ne conservaient pas entre elles les mêmes distances, qu'elles changeaient de forme et de vitesse; mais j'eus d'autant plus de plaisir, lorsque j'en eus senti la raison. Comme il est vraisemblable, par ces observations, que les *taches* sont sur le corps même du Soleil, qui est sphérique et solide, elles doivent devenir plus petites et ralentir leurs mouvements lorsqu'elles arrivent sur les bords du Soleil. Nous invitons les amateurs des vérités physiques à profiter de l'ébauche que nous leur présentons : ils soupçonneront sans doute que le Soleil a un mouvement de conversion, comme l'a dit Jordano Bruno, dans son *Traité sur l'Univers*, publié en 1591, et en dernier lieu Képler, dans son livre sur les mouvements de Mars; car, sans cela, je ne sais ce que nous ferions de ces *taches.* »

Galilée fut plus précis, et ses conclusions furent plus explicites : c'est à ce grand homme qu'est due la découverte, la démonstration de la réalité de la rotation solaire. Il a en outre mesuré la durée de la période de visibilité des taches, qu'il trouva à peu près de quatorze jours.

La rotation du Soleil fut ainsi découverte un demi-siècle environ avant celles des planètes Vénus, Mars et Jupiter, et du même coup se trouva radicalement ébranlée une vieille idée que nous avaient léguée les anciens, celle de l'incorruptibilité des cieux ou des astres. Le Soleil lui-même, ce foyer de lumière, ce type de la pureté absolue pour les astronomes de l'antiquité et du moyen âge, fut reconnu avoir des taches, et, comme nous l'allons voir, des taches variables, mobiles, indices de changements incessants à sa surface.

Sans nous préoccuper pour le moment de la nature des taches du Soleil, voyons comment l'observation de l'une d'elles

conduit à la détermination du mouvement de rotation, de son uniformité et de sa durée.

A l'aide d'une lunette astronomique, c'est-à-dire qui renverse les objets[1], considérons une tache solaire au début de son mouvement en *a*, près du bord oriental du disque (fig. 6). Elle paraît alors sous la forme d'un trait délié, en général beaucoup plus long que large dans un sens parallèle au bord solaire. Pendant les premiers jours, elle semble marcher lentement tout en se rapprochant du centre; sa vitesse croît de jour en jour, jusqu'à ce qu'elle arrive au centre même, ou tout au moins au milieu de sa course en *o*. En ce moment, sa vitesse est maximum : elle décroît de *o* en *b* en repassant en sens inverse par les mêmes valeurs que dans la moitié de la trajectoire.

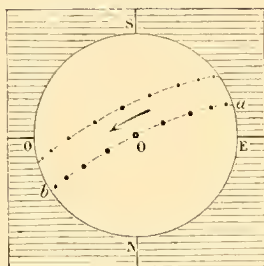


Fig. 6. Mouvement apparent des taches, du bord oriental au bord occidental du disque.

Quelles que soient les positions des taches observées à une même époque, leurs routes ou trajectoires sont des lignes parallèles et semblables, tantôt droites, tantôt elliptiques, selon l'époque de l'observation. De plus, bien que variées de formes

1. Dans une lunette astronomique, le point le plus élevé du disque solaire N se voit au bas de l'image (fig. 6), et au contraire le point inférieur S apparaît en haut. De même, le bord oriental, relativement à l'observateur, est à droite en E, et le bord occidental à gauche en O, contrairement à ce que donnerait la vue à l'œil nu ou dans une lunette terrestre. Nous supposons d'ailleurs l'observateur placé en un point de l'hémisphère boréal de la Terre, voyant le Soleil dans la partie méridionale du ciel : pour une même latitude de l'hémisphère austral, les côtés est ou ouest seraient intervertis. Il faut aussi remarquer que le disque, entraîné de son lever à son coucher par le mouvement diurne, prend par cela même des positions successives telles, que le point le plus bas au moment où le Soleil s'élève à l'horizon, peu à peu se relève et finit au coucher du Soleil par être le point le plus élevé du disque. Cette observation est importante pour suivre et comprendre le mouvement apparent des taches.

et de dimensions, les unes et les autres sont difficilement visibles près des bords, où, comme on vient de le voir, elles semblent très-étroites dans le sens de leurs trajectoires, ou allongées dans un sens perpendiculaire : plus elles sont voisines du centre, plus elles semblent s'élargir dans le premier sens. Il s'écoule, du reste, le même temps entre les instants des apparitions des taches au bord oriental du Soleil, et ceux de leurs disparitions au bord occidental, quelles que soient d'ailleurs les distances de leurs trajectoires au centre, et par suite les longueurs relatives des arcs décrits par chacune d'elles[1]. Il arrive enfin assez fréquemment qu'une tache, après avoir disparu à l'occident, reparaît à l'orient, et alors on trouve que les durées des périodes d'apparition et de disparition sont à fort peu de chose près égales entre elles, c'est-à-dire d'un peu moins de quatorze jours chacune.

Telles sont les circonstances qui témoignent irrécusablement du mouvement de rotation de l'astre; car les taches sont des accidents temporaires de la surface du Soleil, surface que cette rotation nous permet d'observer ainsi dans toute sa périphérie.

Elles appartiennent à la surface même. Si, en effet, il s'agissait de corps tournant à distance autour du Soleil, comme des planètes[2], leur mouvement apparent en avant du disque nous semblerait à peu près uniforme, d'autant plus près d'être uniforme, que cette distance serait plus grande : c'est ce

1. Ceci n'est exact, qu'aux deux époques de l'année où les trajectoires des taches sont rectilignes.

2. Galilée a réfuté l'hypothèse du jésuite Scheiner, qui croyait les taches éloignées du globe solaire, les assimilant à des planètes tournant autour du Soleil et nous présentant leurs faces obscures, comme il arrive de Mercure et de Vénus aux époques de leurs passages au devant du disque solaire. Scheiner fut convaincu; il fit lui-même un nombre considérable d'observations, qu'il consigna dans un volumineux in-folio de 800 pages (qu'on pourrait, dit Delambre, réduire à 50), publié en 1630 sous le titre de ROSA URSINA, *sive Sol ex admirando facularum et macularum phœnomeno varius.*

qu'on observe dans les passages de Vénus et de Mercure. D'ailleurs, ces corps se projetteraient en noir, mais en conservant les mêmes dimensions apparentes au bord qu'au centre : il n'y aurait pas ces variations de forme qu'on a constatées dans les taches. Enfin, la durée du passage au devant du disque devrait être notablement plus courte que la durée de la disparition, laquelle correspondrait nécessairement à une portion beaucoup plus grande des orbites.

On a supposé encore que les taches sont entraînées à la surface du Soleil par un mouvement qui leur est propre, et auquel le globe de l'astre ne participerait point. Il y a dans cette hypothèse quelque chose de vrai : les taches sont souvent affectées d'un mouvement propre; mais, en réalité, c'est bien la masse du Soleil, sa sphère entière, qui entraîne les taches et détermine leur mouvement d'ensemble. Comment des corps isolés, indépendants de la masse et indépendants entre eux, pourraient-ils affecter dans leur marche une telle régularité, se mouvoir dans des trajectoires parallèles semblables? Quant aux variations de vitesse d'une même tache, vue dans son mouvement total du bord oriental au bord occidental en passant par le centre, ce sont elles qui prouvent précisément l'uniformité de la rotation solaire; car, si l'on calcule le rapport de la vitesse apparente à celui de la vitesse réelle à la surface d'une sphère, on trouve qu'il est à peu de chose près égal à celui que donne la géométrie dans l'hypothèse de l'uniformité de la rotation. Les choses se passent comme l'exigent les lois de la perspective, pour une sphère animée d'un mouvement de rotation uniforme autour d'un axe de direction invariable[1].

Ainsi, voilà donc un fait hors de doute. Le Soleil tourne sur lui-même, et le sens de sa rotation est de droite à gauche pour un observateur qui serait situé dans le plan de son équa-

1. On verra cependant plus loin que le mouvement vrai des taches n'est pas rigoureusement uniforme.

teur, la tête du côté de l'hémisphère nord du Soleil. C'est le sens des mouvements de rotation et de translation de la Terre et de toutes les planètes, celui qu'on caractérise en disant que le mouvement se fait d'Occident en Orient[1].

§ 2. DURÉES DE LA ROTATION APPARENTE ET DE LA ROTATION RÉELLE. PÔLES ET ÉQUATEUR DU SOLEIL.

La durée apparente du mouvement des taches est le temps qui s'écoule, par exemple, entre le moment du passage d'une tache au centre et son retour au même point pour un observateur placé sur la Terre. Nous verrons bientôt que cette durée varie selon la latitude des taches rapportée à l'équateur solaire. Cela explique comment il se fait que les nombres trouvés par les astronomes qui l'ont déterminée à diverses époques, varient notablement. Cassini la fixait à 27 j. 12 h. 20 m.; Lalande à 27 j. 7 h. 37 m.; Laugier à 27 j. 4 h. en moyenne. Mais la durée de la rotation réelle est moindre que celle de la rotation apparente, et la cause de cette différence est due à la translation de la Terre autour du Soleil. En effet, supposons un instant la Terre immobile : le temps qu'une même tache, abstraction faite de tout mouvement propre ou de déplacement de la tache sur le Soleil, mettrait à revenir au centre du disque, serait évidemment celui que l'astre mettrait à tourner sur lui-même. Si, au contraire, la Terre décrivait son orbite entière dans le même temps qu'une tache accomplirait sa rotation, les sens des deux mouvements étant les mêmes, il est clair que l'observateur suivrait exactement la tache qui lui semblerait immobile sur le disque solaire.

C'est entre ces deux suppositions extrêmes que se trouve la

1. En regardant le Soleil, on se tourne vers le sud de l'horizon, et il en résulte que la rotation se fait, pour l'observateur, du bord du disque tourné à l'orient vers le bord occidental, de l'Occident à l'Orient du Soleil lui-même.

réalité. Pendant que le Soleil effectue une rotation complète, la Terre s'avance dans le même sens sur son orbite. La tache qui était, par hypothèse, au centre du disque au début de l'observation, est bien revenue à la même position sur la surface du Soleil, mais cette position n'est plus, vue de la Terre, au centre du disque; elle reste à l'occident de ce centre. Pour qu'elle revienne de nouveau au centre apparent, il faut que la tache marche encore un certain temps pendant que la Terre elle-même s'avancera encore sur son orbite : revenue au centre, la tache aura décrit plus d'une circonférence entière. Mais on va voir qu'il est aisé de déduire la rotation réelle de la durée de la rotation apparente.

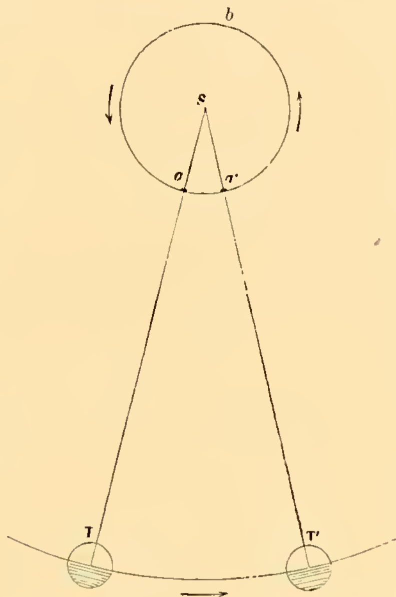


Fig. 7. Différence de durée de la rotation apparente du Soleil et de sa rotation réelle.

Soit *a* une tache vue au centre du disque par l'observateur posté en T, à la surface de la Terre. Au bout d'un peu plus de 27 jours, la tache a décrit une circonférence entière *aba*, plus un arc *aa'*, et elle semble de nouveau occuper le centre pour l'observateur, qui s'est avancé en T'. Toute la question est de savoir combien cet arc *aa'* contient de degrés, de minutes, de secondes. Or, l'arc *aa* a angulairement la même valeur que l'arc de l'orbite terrestre TT', et celui-ci n'est autre chose que le chemin parcouru par la Terre, pendant tout le temps de la rotation apparente du Soleil. Ainsi la tache a décrit une circonférence entière, plus un nombre de degrés égal à celui qui mesure le chemin en question, lequel est bien connu. Un calcul très-simple montre que la durée réelle de la rotation solaire est d'envi-

ron *deux jours* moindre que celle de la rotation apparente. Une tache qui met 27 jours et 4 heures à revenir au centre, donne pour la durée de la rotation 25 j. 34 ou 25 j. 8 h.

Ainsi, le Soleil tourne sur lui-même, d'un mouvement uniforme autour d'un diamètre de sa sphère, en 25 jours terrestres environ. Son équateur est un grand cercle perpendiculaire à son axe de rotation, ou parallèle aux cercles décrits par les taches.

Les astronomes ont des méthodes rigoureuses pour déduire des positions successives d'une tache, la position de l'axe de rotation, et par suite celle des pôles et de l'équateur du Soleil. Si l'axe eût été perpendiculaire au plan de l'écliptique ou de l'orbite terrestre, le plan de l'équateur solaire eût coïncidé avec l'écliptique; et nous eussions toujours vu les taches décrire sur le disque des lignes droites parallèles à l'écliptique même. L'observation prouve qu'il n'en est point ainsi, puisque les trajectoires des taches sont, suivant l'époque, des lignes courbes convexes par en haut ou par en bas, vers le nord ou vers le sud, ou des lignes droites, non parallèles à l'écliptique.

D'après Carrington, l'équateur du Soleil est incliné de 7° 15 sur le plan de l'orbite terrestre, de sorte que la ligne des pôles fait avec le même plan un angle de 82° 45′. Il résulte de là que la Terre, dans son mouvement annuel, se trouve tantôt au-dessus du plan de l'équateur solaire, et alors nous voyons les taches décrire des ellipses dont la concavité est tournée vers le pôle nord; tantôt au-dessous de ce plan, et alors c'est le pôle sud que nous apercevons. Dans ces deux cas, les taches décrivent des ellipses dont la concavité est tournée en sens contraire. En deux points diamétralement opposés de son orbite, la Terre se trouve dans le plan même de l'équateur du Soleil, et ce sont ces points qu'on nomme le *nœud ascendant* et le *nœud descendant*. Alors les trajectoires des taches ont l'apparence de lignes droites, mais inclinées en sens contraires

aux deux nœuds. C'est, d'une part, vers le 4 juin, d'autre part entre le 5 et le 6 décembre qu'ont lieu ces deux passages de la Terre par les nœuds de l'équateur du Soleil, et

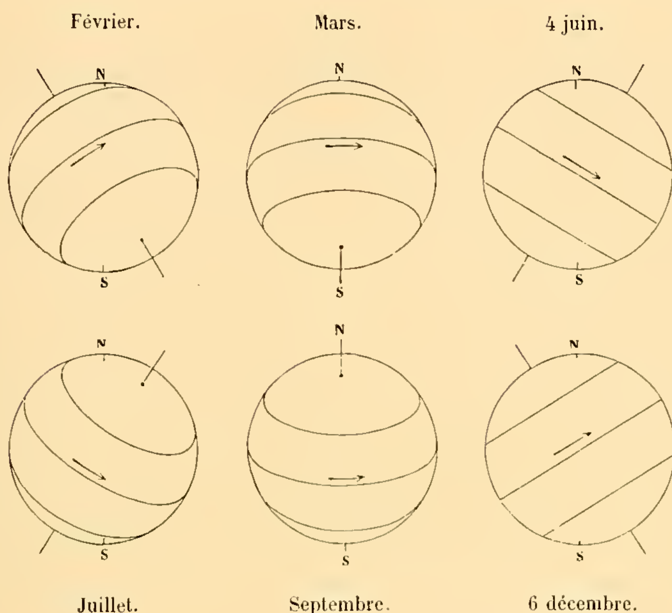


Fig. 8. Formes des courbes décrites par les taches sur le disque solaire, à diverses époques de l'année.

que les taches, entraînées par le mouvement de rotation, nous semblent décrire des lignes droites sur le disque[1] (fig. 8).

1. Comme il faut environ 14 jours à une tache pour décrire la portion visible de sa trajectoire, cette portion n'est rigoureusement rectiligne que le jour où la Terre se trouve à l'un des nœuds; elle se courbe insensiblement les jours qui précèdent et qui suivent. Comme d'ailleurs les taches ont des mouvements propres, la trajectoire vraie diffère plus ou moins de celle que donnerait la théorie en supposant la rotation parfaitement uniforme et la position des taches absolument invariable.

§ 3. ROTATION SOLAIRE AUX DIVERSES LATITUDES.

Jusqu'à ces derniers temps, les astronomes avaient considéré la rotation solaire, déduite du mouvement apparent des taches, comme un phénomène simple, analogue au mouvement de rotation d'un corps solide, de la Terre par exemple, autour d'un axe, de position et de direction invariables. En réalité, les choses sont loin de se passer aussi simplement.

D'abord, la masse du Soleil, la photosphère tout au moins qui est l'enveloppe lumineuse terminale du globe solaire, n'est pas solide, on le verra bientôt, et les taches ne sont pas, tant s'en faut, des points, des accidents fixes de cette surface. Qu'elles fassent partie intégrante de la photosphère, ou qu'elles soient des nuages qui la surplombent à une certaine distance, toujours est-il qu'elles sont éminemment variables de position, de dimensions et de formes, et que c'est par impossibilité de faire autrement, qu'on est forcé de conclure, de leur mouvement de rotation et de sa durée, à la durée de la rotation solaire.

D'ailleurs, mesurer cette durée n'est point chose aussi aisée que nous l'avons d'abord laissé croire, quand il s'agissait pour nous de constater le phénomène dans sa simplicité. Beaucoup de taches ne persistent pas pendant la durée d'une rotation entière ; même pendant la courte durée d'une apparition, elles se déforment souvent, et il est difficile de préciser le point qui doit être considéré comme ne variant pas de position dans l'intervalle. Les taches qui durent pendant plusieurs rotations successives sont plus favorables ; mais elles sont toujours assez variables au début et à la fin ; c'est pendant la partie moyenne de leur durée qu'elles semblent plus permanentes, et alors elles affectent plus spécialement une forme arrondie et régulière.

Il n'est donc pas étonnant que les observateurs aient trouvé des nombres assez discordants pour la durée de la rotation solaire[1], et qu'au dernier siècle, la détermination rigoureuse de cet élément ait fini par être délaissée comme une recherche vaine.

Cependant, dans la première moitié de ce siècle, des observations nouvelles, à la fois plus précises, plus minutieuses et plus prolongées, furent effectuées par divers astronomes, et peu à peu l'on abandonna l'idée d'une rotation uniforme pour toutes les taches. Laugier (de 1837 à 1840) étudia, à ce point de vue, 29 taches, qui lui donnèrent $25^j,34$ pour durée de la rotation moyenne; mais il fit voir que les durées extrêmes oscillent entre un maximum de $26^j,23$ et un minimum de $25^j,28$, divergence trop considérable pour qu'il fût possible de l'attribuer à des erreurs d'observation; une même tache, d'ailleurs, donnait aussi des nombres différant de 2 à 5 heures, selon l'époque de l'observation. Notre savant compatriote en concluait que les taches n'ont pas des positions fixes sur le disque solaire, qu'elles sont affectées de mouvements propres souvent assez rapides. Une preuve plus évidente de ces mouvements propres, était la mesure qu'il avait faite des variations subies par les distances de deux taches voisines[2]. En

1. Voici quelques nombres :

Durée de la rotation, d'après	Scheiner.	25^{jours}	8^{heures}
—	Cassini	25 —	14 —
—	Lalande.	25 —	10 —
—	Delambre.	25 —	0 —

Les nombres extrêmes diffèrent, comme on voit, de plus de la moitié d'un jour.

2. Distances angulaires de deux taches observées par Laugier en 1838 :

le 29 juin.	45° 47′
le 30 —	44° 29′
le 2 juillet	46° 2′
le 3 —	46° 39′
le 4 —	46° 32′

calculant la vitesse du déplacement d'une tache par rapport à une autre tache, Laugier trouva que le mouvement de rapprochement était très-rapide : il s'était fait à raison de 111 mètres par seconde.

Laugier a donc mis hors de doute, et l'inégalité de la durée de rotation suivant les taches, et leurs mouvements propres. Il y avait à trouver la loi de ces inégalités; c'est à l'astronome anglais Carrington que revient l'honneur de cette découverte. Cet observateur a déduit, de sept années et demie d'une étude continue des taches solaires, cette conséquence, que les taches sont animées d'une vitesse angulaire de rotation qui dépend de leur latitude héliocentrique; en un mot, de leur distance à l'équateur solaire. En général, plus une tache est voisine de l'équateur, plus son mouvement est rapide; plus sa latitude est grande, plus ce mouvement est lent. Le tableau suivant, extrait de l'ouvrage de Carrington, fait ressortir ce qu'il y a de régulier dans cette variation, qu'il a cherché à exprimer dans une formule empirique[1].

Distances angulaires de deux taches observées en 1840 :

le 24 mai	78° 30′
le 27 —	73° 32′

Ce sont ces deux dernières taches qui, se rapprochant de 5° en trois jours, ont donné la vitesse citée plus loin de 111 mètres par seconde.

1. Cette formule est la suivante : $865' \mp 165' \sin^{\frac{7}{4}} \lambda = m$. Elle exprime le nombre de minutes d'arc que décrit dans un jour moyen la tache dont la latitude est $\pm \lambda$. A l'équateur λ est 0, et dès lors la rotation diurne à l'équateur devrait être égale à 865′, tandis que le tableau ci-dessus déduit de l'observation donne 867′. L'équateur ne partage donc pas rigoureusement en séries équidistantes les latitudes d'égale durée de rotation. Aussi Carrington paraît-il préférer la formule $865' \mp 165' \sin^{\frac{7}{4}} (\lambda - 1^{\circ})$ pour l'expression des arcs de rotation diurne des taches. M. Faye discutant les mêmes observations a donné d'abord la préférence à la formule $862' - 186' \sin^2 \lambda$, qui a l'avantage d'être continue, puis en définitive à celle-ci : $857'6 - 157'3 \sin^2 \lambda$. L'astronome français est arrivé à ce résultat en choisissant, parmi les taches observées par Carrington, celles qui, ayant effectué une ou plusieurs rotations complètes, devaient donner plus de précision pour la durée de la rotation. En appliquant rigoureusement sa formule, on trouve forcément une rotation

ROTATION DU SOLEIL A DIVERSES LATITUDES.

	Latitudes.	Durées des rotations.			Arcs diurnes de rotation.
Latitudes boréales	50°	27j 446	ou	27j 10h 42m	787′
	35°	26 799	—	26 19 11	806′
	30°	26 207	—	26 9 46	824′
	25°	25 992	—	25 23 49	831′
	20°	25 714	—	25 17 8	840′
	15°	25 382	—	25 9 10	851′
	10°	25 145	—	25 3 29	859′
	5°	25 029	—	25 0 42	863′
Équateur	0°	24 913	—	24 21 49	867′
Latitudes australes	5°	24 971	—	24 23 18	865′
	10°	25 233	—	25 5 35	856′
	15°	25 563	—	25 13 31	845′
	20°	25 745	—	25 17 52	839′
	25°	26 118	—	26 2 50	827′
	30°	26 535	—	26 12 50	814′
	35°	26 832	—	26 19 58	805′
	45°	28 458	—	28 11 0	759′

Des observations dues aux astronomes Spœrer et Secchi ont confirmé, dans ce qu'elle a de général, la loi importante qui résulte des travaux du savant anglais. Il faut ajouter que le phénomène de la rotation, plus rapide à l'équateur que dans les régions voisines du pôle, avait été constaté il y a longtemps, puisque cette constatation remonte à Scheiner et à Hévélius, et que Schrœter, au dernier siècle, l'a lui-même rappelée. Les observations de Bœhm, en 1833, la confirmaient aussi [1].

égale et symétrique pour des latitudes boréales et australes. A l'équateur, la durée est 25j 187, à 10°, 25j 327, à 20°, 25j 739, à 30°, 26j 398, enfin à 45°, 27j 730. Les observations ultérieures montreront si la loi ainsi énoncée est la véritable loi qui fait varier la durée de la rotation solaire avec la latitude des taches observées.

1. Voici les nombres de ce dernier savant :

	Rotation.
à 8°	25j 09
21°	25 68
24°	26 16
26°	25 99
31°	27 09

Mais Carrington a vu le premier une loi, là où les astronomes qui l'ont précédé ne croyaient qu'à une anomalie.

Si l'on considère la rotation équatoriale comme étant celle de l'ensemble de la sphère solaire, on peut adopter provisoirement les éléments suivants, donnés par Carrington comme étant ceux de la rotation du Soleil :

Inclinaison du plan de l'équateur solaire sur l'écliptique[1].	7° 15′
Longitude du nœud rapportée à l'équinoxe moyen de 1850.	73° 40′
Durée d'une rotation vraie équatoriale[2].	25jours
Arc diurne décrit à l'équateur	14° 45′

Le Dr Spœrer, d'après les observations faites en 1861 et en 1866, arrive à des nombres sensiblement différents :

Inclinaison.	6° 57′
Nœud	74° 36′
Rotation.	25j 234
Arc diurne.	14° 16′

Comme conséquence physique et mécanique du mouvement de rotation, le Soleil devrait, au lieu de la forme sphérique, affecter celle d'un ellipsoïde, aplati aux pôles, renflé à l'équa-

1. L'équateur solaire fait les angles suivants avec les orbites des autres planètes :

Mercure.	3° 10′
Vénus	4° 6′
Mars.	6° 50′
Jupiter	6° 22′
Saturne	5° 55′

Ces nombres, empruntés à Cassini, auraient besoin de correction pour être ramenés aux éléments actuels : ils suffisent toutefois pour montrer que, Mercure excepté, les planètes principales se meuvent dans des plans plus inclinés par rapport à l'équateur solaire que relativement à l'écliptique.

2. En une année terrestre, le Soleil tourne donc quatorze fois et demie sur lui-même. Mais, pour une raison aisée à comprendre et dont l'explication se trouve dans le § 2 de ce chapitre, un observateur ne peut, de la Terre, noter que 13½ rotations apparentes. Si une tache pouvait rester en permanence une année, bien qu'elle fasse en ce temps 14,5 rotations complètes, on ne la verrait revenir que 13,5 fois à un même point, au centre de sa trajectoire par exemple.

teur. Les mesures les plus précises des divers diamètres du Soleil n'ont pas permis de constater cet aplatissement. A la vérité, la lenteur de la rotation doit rendre fort petit, et dès lors insensible, cet effet nécessaire de la force centrifuge combinée avec la force de la pesanteur.

N'oublions pas, du reste, en parlant de la lenteur de la rotation, que cette expression s'applique à la vitesse angulaire. Eu égard aux énormes dimensions du globe solaire, la vitesse réelle ou linéaire est considérable dans les points de la surface les plus éloignés de l'axe; c'est ainsi qu'un point de l'équateur du Soleil, en vertu de son mouvement de rotation, est animé d'une vitesse linéaire qui lui fait parcourir environ 2 kilomètres par seconde; c'est, en réalité, un mouvement 4 fois et $\frac{1}{3}$ aussi rapide que celui d'un point de l'équateur terrestre, dont la vitesse angulaire est cependant 25 fois plus grande.

Des faits qu'on vient de voir, on peut bien conclure que le globe du Soleil est animé d'un mouvement de rotation; mais ce mouvement ne peut être assimilé à celui d'une masse solide, comme le mouvement de rotation de la Terre, puisqu'il n'est sensible pour nous que par l'observation des taches, et que les taches n'ont pas de position fixe, invariable, à la surface du Soleil. On ne peut donc assigner une valeur déterminée à la durée de la rotation solaire, à moins que l'on ne convienne de prendre, pour cette valeur, la durée moyenne, imparfaitement connue, des couches équatoriales[1]. Ce qui paraît cer-

1. Pour le docteur Spœrer, c'est à la latitude de 9° à 10° que les taches sont entraînées avec la vitesse de rotation vraie du Soleil. Mais cette assertion est subordonnée à l'opinion particulière à quelques astronomes allemands, mais qui est loin d'être démontrée, à savoir : que les taches sont des objets extérieurs à la photosphère et dont le mouvement rotatoire est altéré par des vents qui soufflent en sens contraire, selon que l'on considère des régions plus voisines ou plus éloignées de l'équateur que la zone en question. Nous reviendrons plus loin sur cette hypothèse des vents de l'atmosphère solaire.

tain, c'est la loi d'après laquelle la vitesse du mouvement de rotation va en diminuant quand s'accroît la latitude; mais ce n'est pas, toutefois, à l'équateur même qu'a lieu le maximum de vitesse; d'après Carrington (comme on l'a vu dans la note de la page 56), il semble que les parallèles d'égale rotation se distribuent de part et d'autre d'une ligne qui est située à 1° de l'équateur vrai. On peut exprimer le même fait, en disant qu'à latitude égale, la vitesse de rotation serait généralement plus grande pour les taches boréales que pour les taches australes.

On ne sait rien non plus de la durée de la rotation, pour les couches qui avoisinent les pôles; on a vu qu'une seule tache a pu donner la rotation pour le parallèle de $+50°$. On peut appliquer, il est vrai, les formules empiriques de Faye ou de Carrington aux régions polaires, mais cela ne peut donner qu'une probabilité fort douteuse; on trouverait ainsi que, près du pôle, l'arc de rotation diurne est à peu près de 700′, ce qui correspond à une durée de rotation d'environ 30 jours.

Il y a bien encore, pour mesurer la durée de la rotation du Soleil, une méthode indépendante de l'observation des taches ou des autres accidents visibles sur la photosphère. C'est celle qu'a indiquée M. Zœllner, et qui est basée sur le déplacement que les raies du spectre subissent par le seul fait du mouvement relatif de l'observateur et de la région lumineuse observée[1]. En 1871, cette méthode a été appliquée par le Dr Vogel, qui a trouvé 2497 mètres pour la vitesse de rotation à l'équa-

1. Voici en quels termes M. Faye expose cette méthode qui exige l'emploi du spectroscope à *réversion* imaginé par le professeur Zœllner :

« Le Soleil possède une vitesse linéaire de rotation de deux kilomètres par seconde à l'équateur. Si l'on dédouble son image à l'aide d'un héliomètre et qu'on mette en contact les deux images à l'équateur, une des deux régions voisines du point de tangence aura deux kilomètres de vitesse vers le spectateur, l'autre fuira en sens inverse avec la même vitesse; d'où un déplacement relatif des raies des deux spectres de $\frac{1}{80}$ environ de l'intervalle compris entre les raies du sodium. Avec un nombre suffisant de prismes, on

teur; on a vu que la rotation déduite de l'observation des taches a donné 2000 mètres environ; c'est donc une différence de près de 500 mètres ou du quart. Mais il reste à savoir quel est le degré d'approximation de la méthode nouvelle, si elle donne la même loi de variation selon les latitudes, et, en attendant, il n'est guère permis de conclure.

Du reste, la rotation du Soleil est-elle constante? Sa durée et ses autres éléments ne varient-ils pas avec le temps? L'instabilité des phénomènes qui servent à déterminer ces éléments, permet de faire cette question et d'émettre une telle hypothèse, d'autant plus qu'il ne s'agit pas là de la rotation de la masse prise dans son ensemble, mais du mouvement des couches superficielles. En comparant les rotations déduites des observations faites par M. Carrington, de 1854 à 1861, à celles de M. Spœrer pour la période de 1860-1863, M. Faye a trouvé entre leurs durées une différence de 1 dixième de jour, indiquant un ralentissement assez sensible pour une période de six années. Ce résultat serait d'autant plus intéressant, s'il était confirmé par des observations ultérieures, qu'il correspondrait à une moitié de la période qui ramène les maxima ou les minima des taches solaires.

parviendra sans doute à mesurer cette petite quantité avec une approximation suffisante, et alors la rotation du Soleil se trouvera déterminée par une méthode tout à fait indépendante de celle des taches. »

III

LES TACHES DU SOLEIL.

§ 1. LA PHOTOSPHÈRE : LUCULES, TACHES SOMBRES, FACULES.

On désigne généralement sous le nom de *photosphère* (sphère de lumière), la surface lumineuse du globe du Soleil. Ce mot n'exprimant que la propriété principale de l'extérieur de l'astre, ne laisse rien préjuger, ni sur sa constitution interne, ni sur son extension au dehors sous la forme d'enveloppes atmosphériques.

Considérée dans son ensemble, la photosphère semble douée partout d'un éclat uniforme, dans les régions voisines des pôles de rotation, dans les latitudes moyennes, comme à l'équateur : du moins, est-ce ainsi qu'elle apparaît dans les instruments d'une médiocre puissance. On verra bientôt cependant que le disque du Soleil est notablement plus lumineux au centre que vers les bords : les images obtenues par projection sur un écran, au foyer d'un télescope, ou par épreuve photographique, accusent toutes cette décroissance d'éclat, cette dégradation de teinte qui est d'ailleurs régulière, s'étend sur toute la périphérie du Soleil et s'observe à toute époque. Mais si l'on rapproche cette observation du fait que le Soleil, en tournant sur son axe, montre successivement toutes ses faces à l'observateur, on est obligé d'en conclure, comme nous ve-



TACHES DU SOLEIL

D'après les observations faites en 1837 par sir John Herschel.

nons de le dire, l'uniformité d'éclat de toutes les régions de la photosphère.

Toutefois, cette uniformité, vraie dans l'ensemble, ne l'est plus si l'on examine la surface du disque solaire, en faisant usage d'un grossissement télescopique convenable. Elle paraît tout d'abord comme marbrée (voyez les planches II et III); un pouvoir optique plus puissant la fait voir criblée ou sillonnée d'une multitude de rides ou de points sombres; si l'on veut, d'innombrables points brillants apparaissent sur un fond moins lumineux. Dès l'origine, on a donné le nom de *lucules* (de *lucere*, briller) aux parties blanches, et celui de *pores* aux parties sombres de la photosphère. Cette sorte de réseau se voit partout et en tout temps sur le disque; c'est comme la trame de la surface solaire, de sorte qu'il n'y a pas lieu de regarder les lucules et les pores comme des modifications accidentelles de cette surface.

Il n'en est pas de même des *taches*.

Les taches solaires sont de deux sortes: les taches sombres, plus ou moins noires, et les taches brillantes. Les premières, qui apparaissent de temps à autre en des points d'ailleurs variables de la photosphère, durent un temps plus ou moins long; puis elles disparaissent, après s'être diversement modifiées dans leurs formes, leurs dimensions et leurs positions sur la photosphère: ce sont donc des accidents, des modifications temporaires de cette surface. Les taches noires ont les premières servi à reconnaître le mouvement de rotation du Soleil.

Les taches brillantes ou *facules*, vues pour la première fois par Galilée, se distinguent par un éclat plus vif du fond de la photosphère elle-même. Souvent elles accompagnent les taches sombres, mais on en voit aussi d'isolées, et elles apparaissent quelquefois en des régions du limbe solaire où les premières ne se voient jamais. Les facules sont d'ailleurs temporaires comme les taches noires.

Telles sont les particularités que l'observation télescopique a révélées, et qui ont suscité de nombreuses conjectures sur la constitution physique du Soleil. On s'est demandé naturellement ce que sont les taches sombres, ce que sont les facules, quelle est la cause de l'apparence rétieulée de la photosphère ; la naissance, le développement ou les transformations des taches, leur disparition ont été longuement et sont encore journellement étudiés par les astronomes, et la discussion de leurs observations accumulées est toujours à l'ordre du jour de la science.

Nous allons d'abord décrire les observations en nous attachant aux plus générales, c'est-à-dire laisser la parole aux faits. Nous passerons ensuite en revue les plus remarquables des nombreuses hypothèses proposées pour l'interprétation des phénomènes, et le lecteur pourra ainsi juger par lui-même du degré de probabilité des unes et des autres.

§ 2. TACHES SOMBRES : PÉNOMBRES ET NOYAUX.

Voyons d'abord ce que sont les taches proprement dites, ou taches noires du Soleil.

Jetons les yeux sur les figures de la planche I, ainsi que sur les nombreuses taches représentées dans ce chapitre. Ces taches, observées et dessinées avec plus ou moins de détails, selon la force du grossissement employé, se ressemblent toutes par un point commun : on y voit deux teintes, nettement tranchées, l'une noire, l'autre grisâtre. La première teinte forme le *noyau*, ou les *noyaux* s'ils sont multiples, de la tache ; la seconde teinte, qui enveloppe généralement la première, constitue la *pénombre*, dénomination assez improprement choisie, surtout si l'on considère que le noyau ou l'ombre est presque toujours nettement séparée de la pénombre, et que celle-ci,

au lieu de se dégrader de l'ombre à la lumière, paraît au contraire plus sombre sur ses bords extérieurs.

Continuons notre examen.

Nous voyons dans les taches dessinées par Herschel, taches d'ailleurs assez irrégulières, une particularité remarquable. Dans une seule pénombre plus ou moins déchiquetée, se trouvent souvent plusieurs noyaux, assez distincts les uns des autres pour être considérés comme indépendants. Outre les taches à noyaux multiples, on voit des portions de pénombre, ou des pénombres isolées, entièrement dépourvues des parties noires : ce sont les taches sans noyau. Enfin, on observe aussi des taches uniquement formées d'une partie noire, non entourée de pénombre ; mais il est à remarquer que ces taches sans pénombre sont généralement de petites dimensions[1].

Les formes des taches sont très-variées : on peut s'en assurer en considérant toutes celles dont nos figures et nos planches reproduisent l'aspect. Souvent elles sont rondes ou ovales ; souvent aussi, leurs contours sont polygonaux ; d'autres sont si irrégulières qu'elles défient toute définition. Comme d'ailleurs une même tache pendant le cours de sa durée conserve rarement ses dimensions et sa forme, il est difficile de rien préciser à cet égard. Seulement, presque toujours, il y a une certaine ressemblance entre la forme du noyau et celle de la pénombre, ou de la partie de pénombre qui avoisine le noyau considéré. Les figures 9, 10, 11 offrent des exemples bien marqués de cette similitude. Les mêmes taches sont aussi remarquables par la division du noyau : on y voit des filets lumineux transversaux, traverser de part en part le noyau noir qui, de simple qu'il semblait d'abord, devient ainsi multiple. Ces

1. Ceci n'est pas sans exception toutefois. « Le 7 février 1800, dit Arago, W. Herschel voyait deux *grandes* taches autour desquelles il n'y avait pas de pénombre. Quant aux *petites*, elles n'en ont presque jamais. » Le même jour et le 12 février suivant, le même observateur voyait de larges pénombres sans noyau central.

filets ont la teinte de la pénombre, dont ils semblent des fragments : Herschel leur a donné le nom de *ponts lumineux* (*luminous bridges*). Quelquefois, ils sont aussi brillants que la photosphère dont ils paraissent être des prolongements. Dans les taches que représentent les figures 9 et 11, on voit le même noyau divisé en quatre ou cinq parties principales, par des filets lumineux entre-croisés, qui semblent des portions étirées de la pénombre ou même de la photosphère. Ce dernier cas est évidem-

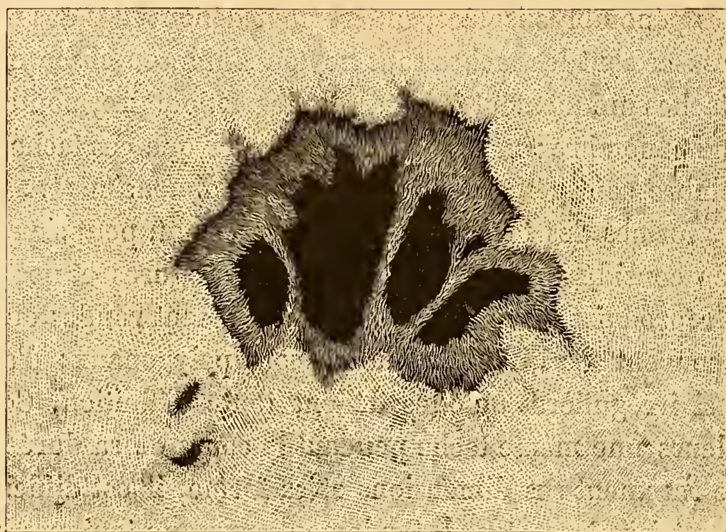


Fig. 9. Tache solaire, d'après Nasmyth.

ment celui de la tache que représente la figure 12. On y voit un arc brillant d'où dardent des pointes pareilles à des flammes qui, selon l'observateur M. Tacchini, semblaient se renouveler incessamment, comme si elles lançaient des étincelles d'un rose jaunâtre. Une demi-heure après, les flammes s'étaient jointes à la pénombre, divisant le noyau en trois parties principales. La masse blanche du centre était très-brillante.

Ceci nous amène à parler de la structure de la pénombre. Les premiers observateurs, munis d'instruments d'une puissance insuffisante, n'y avaient vu qu'une teinte grisâtre à peu

près uniforme. Mais on découvrit plus tard que la pénombre d'une tache est ordinairement sillonnée par des lignes qui, du bord extérieur, vont jusqu'au noyau, lignes parfois droites, parfois courbées en divers sens, mais le plus souvent normales aux contours externes et internes. On dirait voir les lits d'une multitude de ruisseaux qui ont raviné les talus d'une excavation pour aller se précipiter dans le gouffre simulé par le noyau ; ceci soit dit seulement pour faire image, et sans anticiper sur les hypothèses dont il sera question plus loin. Les taches des figures 10 et 19, observées par Capocci et Pastorff, donnent bien



Fig. 10. Taches solaires, d'après Capocci. Stries de la pénombre.

l'idée de cette structure. Une étude plus approfondie a permis de résoudre ces éléments des pénombres en fragments plus petits, semblables à ceux qu'on observe dans la photosphère elle-même. Nous y reviendrons plus loin.

Nous avons dit plus haut que la pénombre n'a pas une teinte uniforme du noyau vers les bords, la portion voisine du noyau étant sensiblement la plus brillante. Cette remarque, faite par J. D. Cassini, puis par Schrœter, est aisée à vérifier sur la plupart des dessins des taches. Ce n'est pas d'ailleurs un effet de contraste, comme on peut s'en assurer en observant séparément la pénombre dans sa largeur. Le P. Secchi dit à ce sujet: « Ces courants (les stries de la pénombre) sont moins conden-

sés, moins lumineux, moins nettement tranchés à l'extérieur de la pénombre, là où ils se détachent de la photosphère, tandis que, près du noyau, ils se pressent, se condensent et deviennent plus brillants. Il arrive ainsi quelquefois que le bord de la pénombre, contigu au noyau, acquiert un éclat plus vif, presque égal à celui de la photosphère ; la tache paraît alors composée de deux anneaux brillants concentriques. Ce n'est pas là une illusion due à un effet de contraste, c'est un accroissement réel de la lumière dû à une condensation de matière lumineuse dans le voisinage du noyau. »



Fig. 11. Taches observées par P. Tacchini le 21 juillet et le 16 août 1873. Divisions du noyau par des courants lumineux.

Il y a toutefois des exemples de pénombres dépourvues de stries et ayant seulement l'aspect d'une couche uniformément grise. Tel est le cas de la 3e tache de la figure 12, où l'on voit trois noyaux noirs enveloppés par une pénombre de ce genre.

Les courants ou stries de la pénombre affectent parfois une direction qui accuse un mouvement en spirale ou tourbillonnaire. Cette apparence est très-sensible dans la tache que re-

présente la figure 13; on y voit les stries de la pénombre contournées comme si elles étaient entraînées par des courants giratoires, au fond d'un gouffre représenté par le noyau.

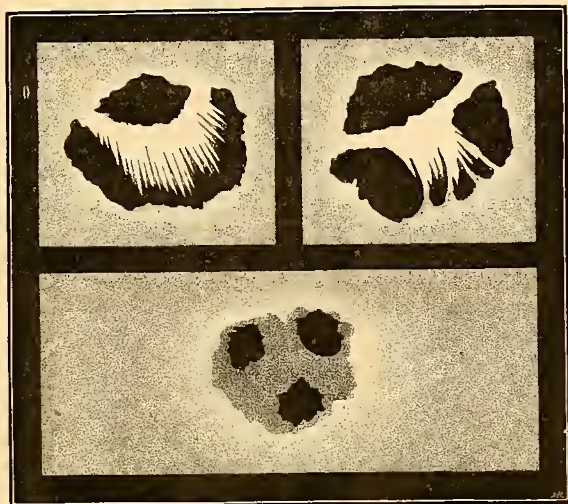


Fig. 12. Taches solaires observées le 14 juin 1872, par P. Tacchini.

L'une d'elles, plus brillante que les autres, s'avance comme un fragment de pont lumineux, jusqu'au centre de la tache. La

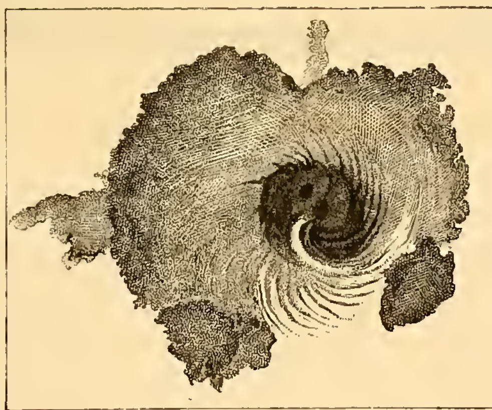


Fig. 13. Tache en forme de tourbillon, observée le 5 mai 1857, par Secchi.

tache de la figure 14 accuse des mouvements semblables, mais avec cette particularité que le sens n'est pas le même pour les directions des courants dans les diverses parties de

la pénombre. On verra plus loin quelle interprétation a été donnée à ces phénomènes.

Si les noyaux et les pénombres ont des limites nettement tranchées, si les pénombres n'ont pas une teinte égale dans toute leur étendue, les noyaux eux-mêmes ne sont pas d'une teinte noire également intense. Plusieurs de nos dessins laissent voir très-évidemment cette différence d'intensité. Au centre de la tache tourbillonnaire de la figure 13, comme dans les noyaux des taches de la planche III, on aperçoit des par-

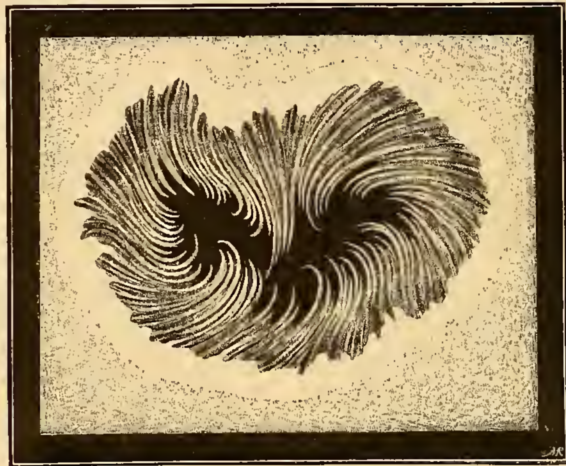


Fig. 14. Tache solaire, observée le 25 juillet 1873, par Tacchini. Stries formant des tourbillons opposés dans la pénombre.

ties plus noires, semblables à des enfoncements, à des trous dans le noyau même. Pour le moment, n'attachons aucun sens réel à ces expressions ; bornons-nous à constater que le noyau d'une tache n'est pas toujours uniformément noir : c'est à l'astronome Dawes qu'est due la première observation de ce fait, fréquemment observé depuis par divers astronomes, Nasmyth, Secchi, Tacchini, Langley, etc.

Il peut arriver qu'un noyau soit isolé de la pénombre par une couche photosphérique. Tel est le cas de la tache représentée dans la figure 15. On y voit un large noyau ovale entouré

d'un anneau de matière brillante, relié lui-même aux facules. Une large pénombre enveloppe l'ensemble, sans atteindre trois noyaux plus petits.

Il serait désirable que des mesures photométriques exactes pussent établir l'intensité respective de la photosphère et des diverses régions d'une tache, tant dans la pénombre que dans le noyau. W. Herschel avait essayé de faire cette détermination, et il était arrivé à ce résultat : l'intensité lumineuse de la photosphère étant 1000, la pénombre se trouvait mesurée par le nombre 469, le noyau par le nombre 7.

Un mot maintenant sur les dimensions des taches.

Ces dimensions sont très-variables, comme on va voir. Mais auparavant, citons une ancienne remarque de Wilson, à savoir : que le diamètre de la pénombre est, en moyenne, égal à environ trois fois celui du noyau. Une telle appréciation est difficile à établir quand il s'agit d'une tache à noyaux multiples, à pénombres déchiquetées et irrégulières, comme celles de la planche I et des figures 15 et 20. Secchi la confirme, mais en parlant des taches régulières, de forme ovale ou ronde, et il dit : « La pénombre a une largeur à peu près égale au tiers de la tache considérée dans toute son étendue. » C'est la proportion donnée par Wilson. Quant aux dimensions absolues des taches, elles ne sont pas moins variées que leurs formes. Il en est de fort petites, qui paraissent comme des points à peine perceptibles, même à l'aide de grossissements considérables : c'est parmi elles qu'on rencontre le plus ordinairement les noyaux sans pénombre ou les pénombres sans noyaux. (Voyez les planches I et III.)

Certaines taches ont au contraire présenté des dimensions considérables : « Vers le milieu de 1763, dit Lalande, j'ai aperçu la plus grosse et la plus noire que j'aie jamais vue ; elle avait 1′ au moins de longueur, » c'est-à-dire la 32ᵉ partie environ du diamètre solaire. Une observation de Mayer du

15 mars 1758, signale une tache considérable : « On voyait, dit-il, une tache énorme dont le diamètre égalait le 20e du diamètre solaire (environ 96″). Arago en cite une de 167″, presque trois fois aussi longue que celle de Lalande. Schrœter en a mesuré une dont la surface équivalait à seize fois la surface d'un cercle de même rayon que la Terre, quatre fois égale dès lors à la superficie entière de notre globe : elle mesurait



Fig. 15. Pénombre isolée du noyau. D'après un dessin de Tacchini.

donc un diamètre moyen de 71″ (12 000 lieues). W. Herschel vit en 1779 une tache qui avait 17 000 lieues de diamètre. Celles que nous avons reproduites ici (fig. 14) d'après le dessin du capitaine Davis, montrent quelles énormes dimensions atteignent parfois ces accidents de la surface du Soleil ; mesurée à l'échelle du diamètre réel, la plus étendue de ces taches, formée, il est vrai, d'un double noyau, n'avait pas moins de 300 000 kilomètres dans sa plus grande longueur : sa surface était en-

viron, la pénombre comprise, de 200 millions de myriamètres carrés[1]. Si, comme nous le verrons plus loin, les taches sont des déchirures profondes de l'enveloppe lumineuse du Soleil, quelle capacité doivent offrir de tels gouffres, sortes d'abîmes

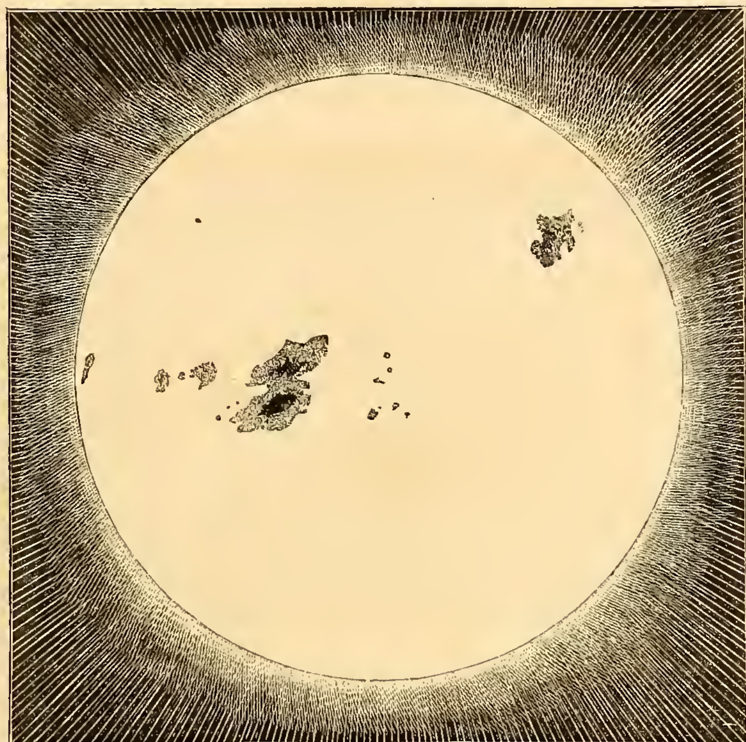


Fig. 16. Grandes taches solaires, observées le 30 août 1839, par le capitaine Davis.

gigantesques, au fond desquels la Terre n'apparaîtrait plus que comme un rocher, une pierre dans le cratère d'un volcan !

1. Avec de pareilles dimensions, les taches doivent être visibles à l'œil nu : le seul obstacle à cette visibilité est dans l'éclat du disque solaire, qu'il est aisé, comme on l'a vu, d'affaiblir. C'est à des phénomènes de ce genre qu'il faut évidemment rapporter le prétendu passage de Mercure sur le Soleil en l'an 807; la tache noire que l'on prit alors pour le disque obscur de la planète fut visible pendant 8 jours. En 840, c'est Vénus qu'on crut voir ainsi pendant 91 jours; en 1096, on aperçut des signes sur le Soleil, *signa in sole*. Mais on ignorait alors la nature de ces phénomènes, tandis que depuis la découverte des taches, on ne se trompa plus sur ce point ; nombre

§ 3. FORMATION, DÉVELOPPEMENT ET DISPARITION DES TACHES.

On vient de voir sous quels aspects se présentent les taches sur la photosphère, alors qu'elles sont toutes formées. Mais comment naissent-elles, se transforment-elles, et arrivent-elles à disparaître? L'histoire de ces phases diverses, si importante pour découvrir la nature de ces accidents de la surface solaire, est-elle la même pour toutes les taches?

Telles sont les questions que nous allons examiner maintenant. Commençons par les circonstances de la naissance des taches.

Nombre de taches apparaissent toutes formées, les unes parce que, ayant pris naissance dans la partie du globe solaire invisible, elles n'ont été amenées en vue de l'observateur que par le mouvement de rotation, les autres parce qu'elles se sont formées rapidement dans les intervalles des observations.

Certaines taches au contraire se forment lentement. On voit d'abord un fort petit point noir semblable à un pore élargi; peu à peu les dimensions de ce point augmentent, par une dilatation continue, mais le noyau est le plus souvent d'abord dé-

d'observateurs citent des cas de visibilité sans lunettes. Ainsi en août 1612, Galilée et ses amis virent à l'œil nu, au lever du Soleil, une tache de 1′ au moins de diamètre : elle se montra ainsi trois jours de suite; c'est une tache visible à l'œil nu, en 1779, qui détermina W. Herschel à étudier la constitution physique du Soleil. M. Schwabe, qui s'est occupé pendant une si longue suite d'années des taches solaires, en a observé fréquemment d'assez grandes pour être visibles à l'œil nu; « les principales parurent, dit-il, en 1828, 1829, 1831, 1836, 1837, 1838, 1839, 1847, 1848. Je considère comme grandes taches celles qui embrassent au moins 50″; c'est seulement à cette limite qu'elles commencent à devenir visibles pour de bons yeux, sans le secours du télescope. » Le 28 juin 1868, il y avait sur le disque une tache dont un observateur, M. Gilman, de New-York, a donné la description, en ajoutant cette mention : « Spot visible to naked eye, » *tache visible à l'œil nu*. Ce genre d'observation serait encore plus fréquent, si l'on y portait quelque attention.

pourvu de pénombre, et c'est seulement quand il a atteint certaines dimensions, que celle-là se développe à son tour. Le point noir, qui doit former le noyau de la tache, se montre souvent au sein d'une facule; mais il n'est pas toujours seul, et la tache commence quelquefois par un groupe de plusieurs pores se détachant sur des facules très-brillantes (fig. 17). Ces pores multiples, tantôt se déplacent et disparaissent pour laisser la prédominance à l'un d'eux, tantôt donnent lieu à

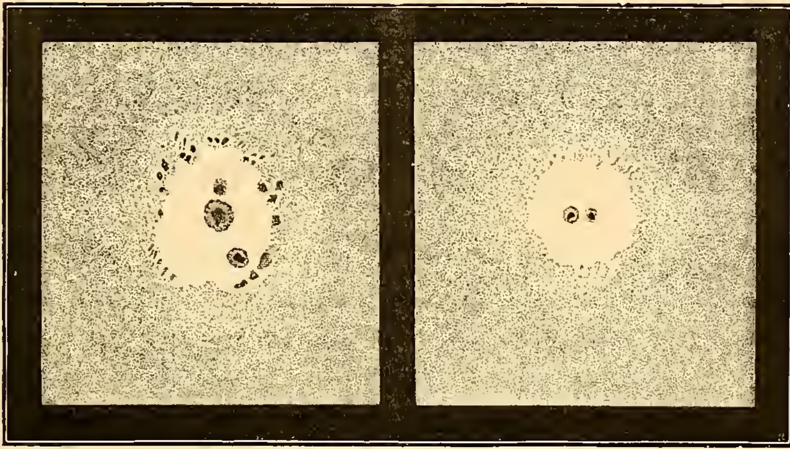


Fig. 17. Pores indiquant la formation de taches au sein de facules. D'après les dessins de G. de Lisa.

plusieurs noyaux distincts formant un groupe de taches. D'après Secchi, cette formation lente a lieu surtout aux époques de calme de la photosphère solaire, et donne lieu aux taches régulières et arrondies.

Voici, d'après le même astronome, un exemple de formation rapide d'une tache solaire :

Le 28 juillet 1865, on n'apercevait rien d'extraordinaire au point où la tache devait faire son apparition : il n'y avait « ni pores, ni facules. Le 29, il y avait simplement trois points noirs. Le 30, à $10^h 30^m$, nous fûmes bien surpris de trouver une tache énorme correspondant à peu près au centre du disque. Le diamètre moyen de la partie troublée était de 76″,

c'est-à-dire quatre fois et demie environ le diamètre de la Terre. »

Cette tache, à formation rapide, est d'ailleurs restée fort irrégulière pendant toute la durée de son apparition. En voici l'histoire résumée. Le premier jour de sa naissance presque spontanée, elle offrait quatre centres ou noyaux noirs enveloppés par une pénombre très-tourmentée, parsemée de filaments lumineux, d'amas de facules. Mais dès le soir, l'aspect de la tache s'était modifié au point de ne plus ressembler à celui du matin que par le caractère fondamental, les quatre centres principaux. Le 31 juillet, le changement fut complet. Au lieu d'une forme grossièrement ovale, on aperçoit deux traînées, allongées et contournées, de noyaux noirs environnés de pénombres; entre ces traînées, la matière lumineuse des facules est étirée, « son aspect rappelle celui d'une boule de coton cardé qu'on allongerait en tirant les deux côtés. » Le groupe a d'ailleurs une longueur double de celle du 30. « Les jours suivants, la masse qui séparait les quatre ouvertures (noyaux) se transforma à peu près en une pénombre sur laquelle étaient dispersés des grains lumineux. » Puis les centres s'isolèrent de plus en plus. Le 27 août, après une complète rotation du Soleil, ils se reconnaissaient encore, bien que grandement séparés. Au bout d'une nouvelle rotation, le 17 septembre, on n'apercevait plus que des pores et des facules. « Enfin, dit Secchi, après une troisième rotation, il ne restait plus de traces de cette immense perturbation qui avait agité l'atmosphère du Soleil. »

Les exemples de transformations des taches, de changements rapides survenus dans leur structure, le nombre, la forme et les dimensions des noyaux et des pénombres sont très-fréquents. D'une rotation à l'autre, on constate en outre des déplacements relatifs des groupes, qui montrent que les taches, indépendamment de l'entraînement commun dû à la rotation, subissent encore des changements de position qui

leur sont propres. La figure 18 donne un exemple de ces diverses transformations opérées dans l'intervalle d'une rotation solaire. Le 24 mai 1828, on observait quatre groupes A, B, C, D,

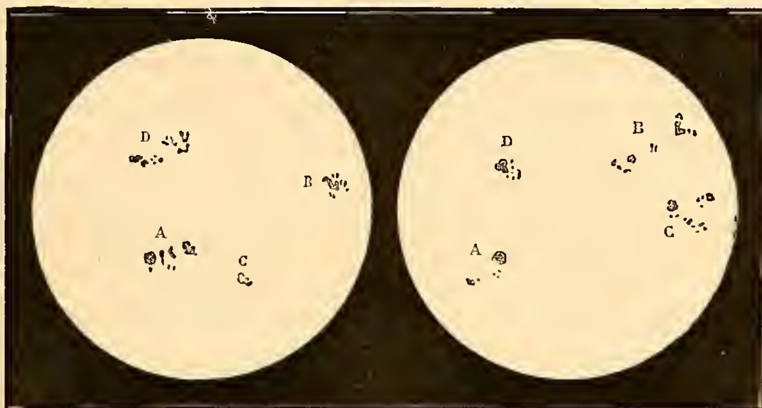


Fig. 18. Transformation de groupes de taches, dans l'intervalle d'une rotation. D'après Pastorff : du 24 mai au 21 juin 1828.

qui, vingt-huit jours après, occupaient les positions marquées par les mêmes lettres sur le second diagramme de la figure.

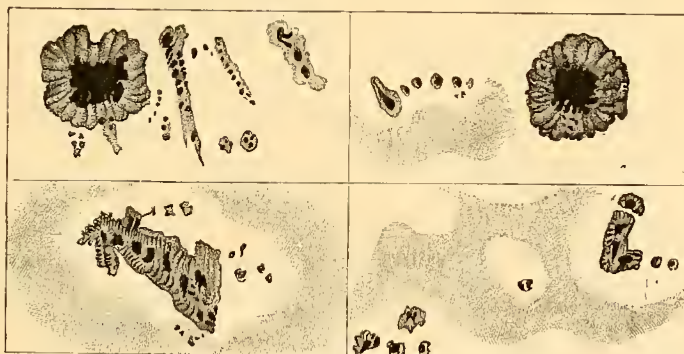


Fig. 19. Transformations de taches solaires dans l'intervalle d'une rotation. Détails des groupes A et B, d'après Pastorff.

Il y a là la preuve évidente et très-marquée d'un déplacement relatif des groupes ; et la figure 19 montre de plus quels changements de dimensions et de forme ont subis deux de ces

groupes pendant le même temps, surtout la tache à noyaux multiples et de forme irrégulière qui faisait partie du groupe B. Quelques jours, parfois quelques heures, suffisent pour reconnaître les variations singulières dont nous parlons. Voici (fig. 20) une tache observée par Dawes en octobre et novembre 1859, et sur laquelle on peut suivre de deux en deux jours les changements notables survenus dans les noyaux comme dans la pénombre, dans les dimensions de la tache comme dans sa forme. On y retrouve aussi, notamment dans le troisième dessin, quoique moins accusé que dans la figure 13, le mouvement tourbillonnant sur lequel nous avons appelé plus haut l'attention.

Enfin on peut voir (fig. 21 et 22), dans les différents dessins d'une même tache observée séparément par les astronomes Howlet et Chacornac, en octobre 1865, un exemple de transformation plus rapide encore, puisque les quatre observations sont séparées les unes des autres par des intervalles de vingt-quatre heures seulement. Un pont lumineux s'est peu à peu développé, traversant et surplombant le noyau le 14 et le 15 octobre, pour se rompre le jour suivant. Les variations de la pénombre suivent d'ailleurs presque toujours les variations du noyau.

Les changements qui s'opèrent dans le sein d'une même tache ou dans un groupe de taches, sont si variés, qu'il est impossible de les définir. On peut cependant y distinguer deux caractères, inverses l'un de l'autre, l'un par lequel des taches d'abord isolées se rapprochent, se réunissent et se confondent; l'autre par lequel au contraire une tache, unique d'abord, se divise en taches distinctes.

Le premier mode, celui de la réunion, peut se faire soit par déplacement et rapprochement des noyaux séparés, soit par un agrandissement de tous ou de chacun, qui a pour terme leur confusion en un seul noyau. Plusieurs noyaux, entourés d'une seule pénombre, séparés les uns des autres par des ponts lumineux, par des amas de matières photosphériques,

semblent quelquefois se réunir par le fait de la dissolution de cette matière. Le noyau devenu unique, acquiert par le fait une forme plus régulière, plus arrondie. D'après Secchi, c'est un caractère commun aux taches qui tendent à s'arrondir, « et la forme ronde est, pour ainsi dire, la forme normale à laquelle parviennent *toutes* les taches lorsqu'elles sont complé-



Fig. 20. Transformation rapide d'une tache, d'après les observations de Dawes, les 21, 29 et 31 octobre, et le 2 novembre 1859.

tement développées ». Le mot *toutes*, que nous soulignons ici, est de trop dans la phrase de l'astronome romain. L'histoire, citée plus haut d'après lui, de la tache du 30 juillet 1865, prouve que certaines taches peuvent avoir une longue durée à la surface du Soleil, sans atteindre la période de régularité où s'observe la forme normale.

Le second mode de transformation des taches, la segmentation ou division en plusieurs noyaux distincts, est souvent un symptôme précurseur de leur disparition. « Quand le noyau d'une tache diminue et disparaît, c'est ordinairement, suivant Scheiner, par un empiétement irrégulier de la pénombre. Ce mouvement de la pénombre vers le noyau, amène souvent la séparation de celui-ci en plusieurs noyaux distincts. Le noyau s'évanouit avant la pénombre (cet aphorisme de Scheiner est confirmé par beaucoup d'observations d'Hévélius et de Derham).

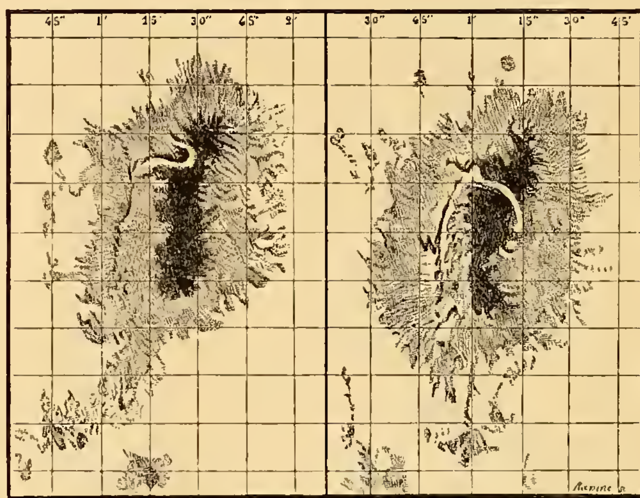


Fig. 21. Changement de forme d'une tache solaire, d'après Howlet.

Herschel décrit le même phénomène en ces termes : « Un « noyau qui se rétrécit et va disparaître, se divise souvent en « plusieurs noyaux distincts. » (Arago, *Notice sur W. Herschel.*)

Mais il peut arriver que la division du noyau d'une tache ne soit qu'apparente : c'est ce qui a lieu quand, à côté du noyau primitif et dans la même pénombre, naissent de nouveaux noyaux.

Quelles que soient les causes physiques des changements qui se manifestent dans les pénombres et les noyaux des taches,

ce qui est certain, c'est que ces mouvements se font souvent en des temps très-courts. Scheiner, Galilée, Cassini constatèrent les premiers cette rapidité. Arago a cité des cas intéressants, une observation de Derham en 1706, une autre de F. Wollaston en 1774. Le premier de ces savants vit, l'*œil à la lunette,* « une tache noire se montrer et disparaître à plusieurs reprises au centre d'une brillante facule. » Wollaston fut témoin de la rupture d'une tache en plusieurs morceaux. « Les apparences furent semblables à ce qui arrive lorsque,



Fig. 22. Changement de forme d'une tache solaire, d'après J. Chacornac et Howlet.

après avoir lancé une plaque de glace sur la surface d'un étang gelé, les divers fragments en lesquels la plaque se partage glissent dans toutes sortes de directions. » J. Chacornac dit dans ses *Études d'astronomie solaire :* « J'ai suivi d'un regard continu des taches qui se sont jointes à d'autres plus grandes en franchissant un espace de 17″ d'arc en trois heures de temps. » C'est une vitesse d'environ 1150 mètres par seconde. Les observations modernes nous fourniraient de nombreux exemples de transformations rapides des taches et des facules, et nous verrons bientôt d'autres phénomènes analo-

gues ayant pour théâtre, non plus la surface même de la photosphère, mais les couches surplombantes reposant sur cette surface.

Les taches n'apparaissent pas toujours isolées. Elles se distribuent assez souvent par groupes, même lorsque l'on considère comme tache unique celle formée de plusieurs noyaux

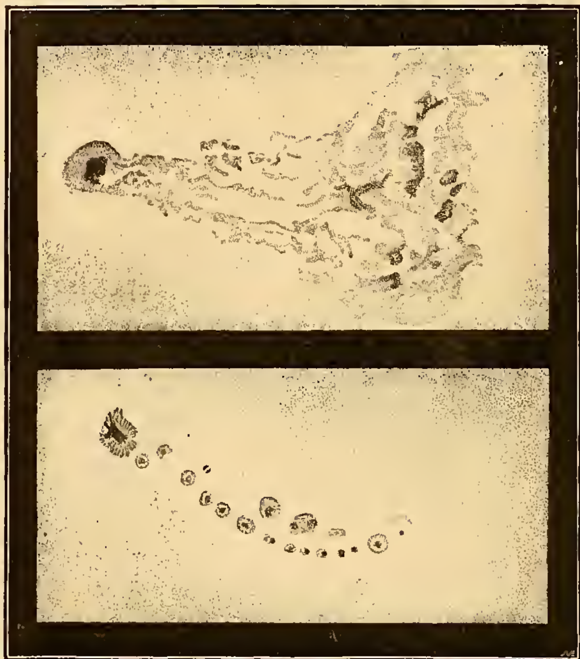


Fig. 23. Groupes de taches, disposées en traînée, d'après J. Chacornac, 20 avril 1852; autre groupe, *id.*, d'après G. de Lisa.

qu'enveloppe une même pénombre. Il y a presque toujours une réelle solidarité entre les parties d'un même groupe que relient d'ailleurs les facules dont les taches sont environnées. On a vu plus haut que l'apparition des taches est ordinairement précédée et leur disparition suivie par des facules : c'est l'ensemble de tous ces phénomènes qu'il est intéressant d'étudier, parce qu'ils sont l'indice d'une agitation locale de la matière photosphérique dont il y aurait à formuler les lois et à trouver les causes.

D'après J. Chacornac, les groupes de taches sont très-fréquemment caractérisés par une disposition en traînée, en longue file de taches et de pénombres disposées selon le sens des parallèles de rotation. De 1849 à 1864, cet astronome a observé et dessiné près de 500 groupes ayant l'aspect des taches représentées dans la figure 23; une tache, ordinairement la plus noire, la plus régulière, la plus ronde, précède toutes les autres dans le sens du mouvement de rotation du Soleil; c'est aussi celle qui disparaît la dernière.

Cette remarque est d'autant plus importante qu'elle permet

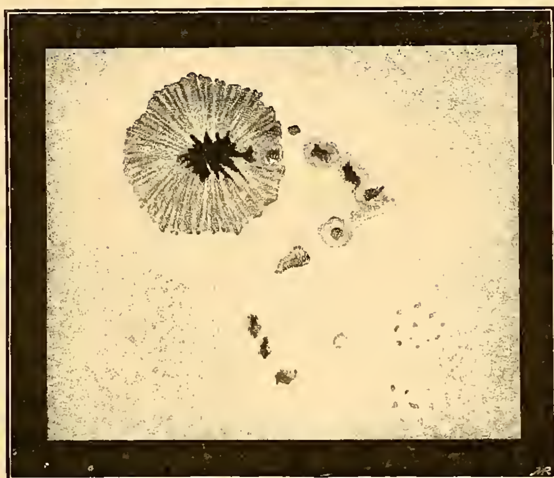


Fig. 24. Tache solaire avec traînée, d'après G. de Lisa.

d'expliquer une liaison remarquable constatée entre les facules et les taches. Cette liaison ressort avec évidence du relevé suivant des observations faites à l'observatoire de Kew par MM. Warren de la Rue, Stewart et Lœwy. Sur 1137 taches que les photographies solaires ont montrées accompagnées de facules, 584 avaient leurs facules à gauche, 45 seulement à droite; les 508 autres également des deux côtés. J. Chacornac rapprochant ses propres observations de traînées de taches et celles des savants anglais, interprétait naturellement cette double relation : « Comme les taches, disait-il, ne disparaissent

sur l'hémisphère visible que par l'envahissement des facules qui recouvrent les régions où elles se sont montrées, il résulte de là, que lorsque les taches de gauche se sont effacées, on ne voit alors du groupe que la tache primitive, et une traînée de facules à la place des taches rebouchées. »

La durée de la persistance d'une même tâche à la surface du Soleil est très-variable. Quelques-unes apparaissent et disparaissent en quelques jours, durant ainsi moins qu'une demi-rotation ; ce sont généralement les plus petites, les taches insignifiantes. D'autres font une ou deux révolutions. Les exemples de persistance plus prolongée sont rares ; en voici néanmoins quelques-uns. Cassini cite dans ses *Éléments d'astronomie* une tache qui fut observée en novembre et décembre 1676 et janvier 1677, et persista plus de 70 jours, reparaissant pour la troisième fois, « ce qu'on n'a jamais observé dans aucune des taches. » En 1779, une grande tache dura six mois, et en 1840 Schwabe observa une tache qui revint jusqu'à huit fois, ayant de la sorte persisté plus de deux cents jours. De janvier à mars 1866, Secchi vit une même tache accomplir quatre rotations successives, et celle que le même astronome observa du 8 mai au 9 juillet 1866, eut une durée de 62 jours. La rapidité des changements qui se font dans un même groupe de taches, rend les observations de durée incertaines ; pendant la période d'invisibilité, une tache peut disparaître ; une autre tache peut faire sa réapparition dans les mêmes régions du Soleil. Mais en tout cas, il résulte des faits cités, qu'une même région de la photosphère peut rester agitée par les mouvements qui donnent lieu aux facules, aux taches sombres, pendant plusieurs révolutions successives du Soleil.

Les observateurs s'accordent d'ailleurs à reconnaître que ce sont les taches régulières qui d'ordinaire persistent le plus longtemps.

§ 4. DES FACULES.

En certains points de la surface du Soleil, principalement vers les bords du disque et dans le voisinage des taches, on aperçoit les parties brillantes nommées *facules*. Généralement en ces points, la photosphère est dépourvue de pores, de sorte que les facules semblent formées par la réunion ou accumulation des points brillants ou lucules : il y a toutefois, on le verra plus loin, des exceptions à faire.

En jetant les yeux sur les figures 10, 11, 25 et 26, etc., et sur la photographie du disque solaire de la planche II, on se fera une idée de l'apparence que présentent les facules, et il sera aisé de reconnaître que c'est un phénomène bien réel, non un effet de contraste, ainsi que jadis Huygens l'avait à tort supposé[1].

Si un doute avait pu subsister à cet égard, il eût été levé par le fait qu'on observe fréquemment des facules isolées. Nous en donnons ici même des exemples (fig. 26). On aperçoit, se détachant sur la teinte relativement sombre du bord solaire, de larges espaces plus brillants qui ne laissent voir ni noyaux de taches ni pénombres. Dans les facules où se trouve un point noir (fig. 17) ou une tache bien caractéristique, il est visible que les parties brillantes qui les constituent, s'étendent bien au delà des contours des taches, ce qui ne serait point si ces parties brillantes n'étaient dues qu'au contraste des parties sombres.

J. D. Cassini avait déjà vu des facules isolées, puisqu'il dit :

1. Je doute fort, disait ce grand homme dans son *Cosmotheoros* (cité par Arago), qu'il y ait dans le Soleil quelque chose de plus lumineux que le Soleil même. Quand je consulte les observations les plus exactes qui aient été faites à ce sujet, je trouve que si l'on remarque de temps en temps des points plus clairs, plus brillants que le reste du globe, c'est près des taches noires; or doit-on être surpris que le voisinage de l'obscurité fasse paraître certaines parties plus éclatantes qu'elles ne le sont réellement ? »

« Les facules se montrent ordinairement à la place que les taches occupaient auparavant. On dirait que le Soleil reste plus épuré dans les endroits où des taches se sont formées. »

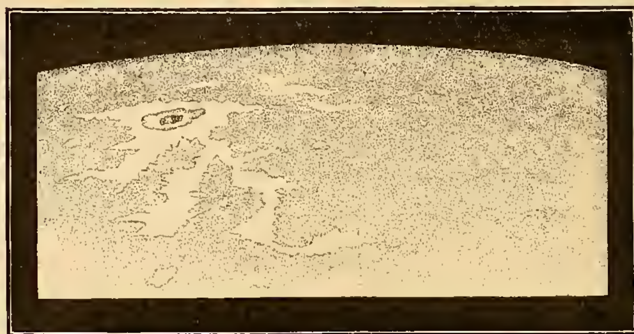


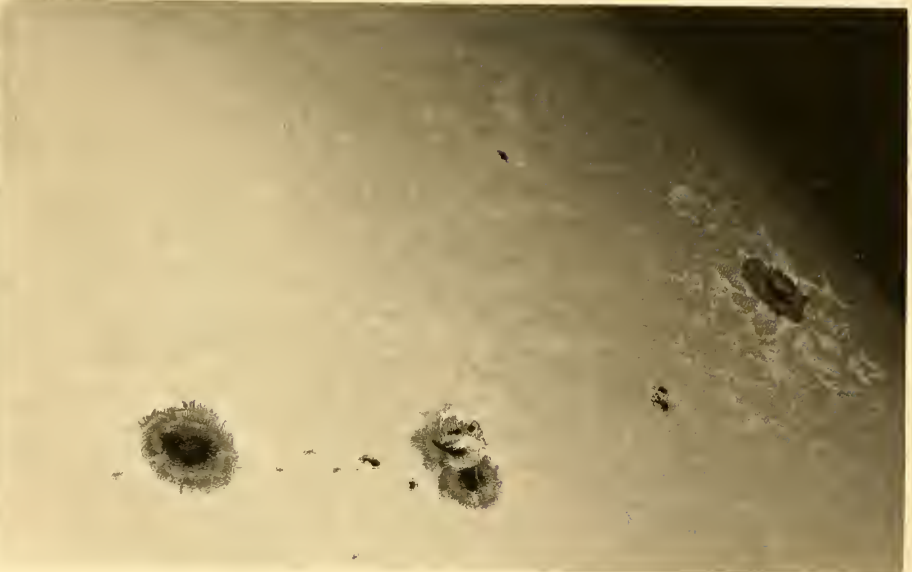
Fig. 25. Facules observées autour d'une tache, d'après P. Tacchini.

Cette remarque est d'ailleurs fort intéressante, en ce qu'elle montre une relation d'origine entre les facules et les taches,



Fig. 26. Facule isolée, observée par Tacchini pendant l'intervalle d'une demi-rotation

relation complétée en ces termes par le même astronome : « On voit quelquefois une tache se transformer en facules et redevenir tache ensuite. » Nous reviendrons sur ce point.



TACHES ET FACULES DU SOLEIL

20 Sept 1861

Fac-simile d'une Photographie de M. Warren de la Rue

Arago dit, dans sa Notice sur W. Herschel : « Les grandes facules, celles qui ont été les plus apparentes *près des bords du Soleil*, disparaissent ordinairement, quand le mouvement de rotation de l'astre les a amenées *au centre du disque*. Cette observation, très-ancienne, a été confirmée par Herschel. » On pourrait interpréter le fait ainsi constaté, en admettant que les facules n'ont qu'une faible durée, inférieure au quart de la durée d'une rotation solaire ; mais le contraire est prouvé par des observations directes. Bornons-nous à citer celle qu'a



Fig. 27. Ruisseaux divergents de facules. Observation du 14 février 1865, par J. Chacornac.

faite à Palerme, en 1873, l'astronome italien P. Tacchini. Une « belle facule, très-vive et compacte », observée le 24 juin sur le bord solaire oriental, a reparu le 5 juillet au bord occidental, dès lors pendant une demi-rotation sans présenter ni tache ni trou noir. » C'est ce dont témoigne la figure 26.

Quant aux facules qui environnent les taches ou les groupes de taches, on a déjà vu qu'elles sont particulièrement abondantes à gauche des taches, dans le sens du mouvement de rotation.

Les facules qui environnent les taches affectent parfois des formes très-irrégulières ; elles se divisent en ruisseaux de ma-

tière lumineuse qui divergent de tous côtés autour de la pénombre, comme la tache de la figure 27, observée et dessinée en 1865 par notre regretté compatriote J. Chacornac.

D'après le P. Secchi, ce sont surtout les taches qu'il nomme *cratériformes* (voyez la figure 25), qui présentent de telles ramifications dans les facules dont elles sont entourées; mais cet aspect n'est bien facile à distinguer que près des bords, et alors il arrive que sur le contour même du disque les facules paraissent proéminentes, comme si elles dépassaient en hauteur le niveau de la photosphère.

§ 5. STRUCTURE DE LA PHOTOSPHÈRE.

De l'étude des taches sombres et brillantes, accidents temporaires de la surface du Soleil, passons à celle de la structure permanente de la photosphère.

On sait déjà que la photosphère apparaît dans les télescopes comme sillonnée d'une multitude de rides lumineuses et de rides sombres qui, s'entre-croisant dans tous les sens, la font ressembler, ainsi qu'on l'a dit bien des fois, au fond pointillé d'une gravure [1].

Cet aspect de la photosphère varie avec les conditions de l'observation; aussi les descriptions ne semblent-elles pas toujours parfaitement concordantes. Voici celle qu'en donne J. Herschel, dans la 6e édition de ses *Outlines of astronomy :*

1. Scheiner vit le premier cet aspect *chagriné* de la photosphère, peu après que Galilée eut appelé l'attention du jésuite allemand sur les taches brillantes ou *facules*.

Lucules est, croyons-nous, la plus ancienne dénomination des parties brillantes du fond du disque. W. Herschel les nommait *corrugations* ou rides, ou encore *bright nodules*, nodules brillants. Voici d'autres noms donnés à ces objets par divers observateurs contemporains, dont chacun paraît avoir été frappé par une apparence particulière de ces objets, soit que leur aspect varie avec les conditions atmosphériques de l'observation et le pouvoir gros-

« Les parties du disque solaire non occupées par les taches sont loin d'être uniformément brillantes. Le fond en est finement pommelé, parsemé de petits points sombres, ou *pores*, qui, examinés attentivement, se trouvent dans un état de mobilité continuelle. Rien ne peut donner une idée plus fidèle de cette apparence que celle d'un précipité chimique floconneux, qui tombe lentement dans un fluide transparent, quand on le regarde perpendiculairement, d'en haut. » Le P. Secchi dit de son côté que, si l'on examine directement le Soleil avec un oculaire puissant, « on voit que la surface est recouverte d'une multitude de petits grains, ayant presque tous les mêmes dimensions, mais des formes très-différentes, parmi lesquelles l'ovale semble dominer. Les interstices très-déliés qui séparent ces grains forment un réseau sombre, sans être complétement noir. »

Les granules brillants ou *granulations* (cette dénomination a le mérite, comme le remarque fort bien M. Huggins, de ne rien préjuger sur leur nature) se voient dans toutes les régions de la photosphère, à l'équateur comme aux pôles, au centre du disque comme sur les bords. Il faut en excepter cependant les noyaux noirs des taches et les facules, où l'on en voit très-rarement; là, d'ailleurs, comme dans les pénombres, les grains n'ont plus la même forme ; ils sont plus allongés et autrement groupés. « Partout où les taches sont absentes, dit M. Huggins, les granules conservent dans des

sissant de l'instrument employé, soit qu'en réalité leur forme varie avec la portion du disque explorée, à des distances plus ou moins grandes des taches :

Rice-grains, grains de riz (M. Stone);
Willow-leaves, feuilles de saule (M. Nasmyth);
Granulations ou *minute fragments of porcelain*, granulations ou menus morceaux de porcelaine; *thatch straws*, couverture de chaume (dans les pénombres) (M. Dawes);
Cristaux (M. Chacornac);
Shingle beach, plage de galets ou de cailloux roulés (M. Brodie).

limites assez étroites, même forme, même diamètre, même mode de groupement. » Cependant, William Herschel les distinguait des facules, en ce que celles-ci se voient plus distinctement au bord, tandis que c'est au contraire vers le centre que s'aperçoit le mieux le pointillé lumineux[1].

Ces points lumineux, qui paraissent si petits qu'un fort

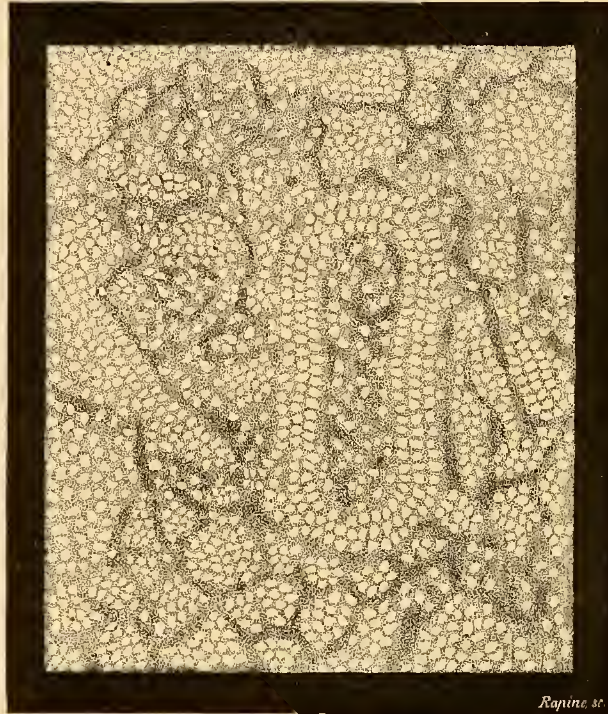


Fig. 28. Granulations de la surface du Soleil, d'après W. Huggins.

grossissement est nécessaire pour les distinguer, ont cependant des dimensions réelles énormes M. Huggins évalue leur diamètre à 1″ en moyenne, et le plus grand diamètre des granules ovales à 1″,5 : par exception, on en voit qui mesurent

1. Deux raisons peuvent expliquer ce fait : la perspective d'abord, qui sur les bords nous fait voir les objets sous une grande obliquité; en second lieu, l'absorption de la lumière, qui rend moins tranché le contraste des parties sombres et des parties lumineuses

jusqu'à 2 ou 3 secondes. D'après Secchi, ces dimensions sont exagérées ou plutôt accrues par la diffraction, et il les réduit à 0″,5 ou 0″,3. Mais même alors, chacun de ces objets lumineux aurait une étendue de 2 à 300 kilomètres : l'estimation d'Huggins va jusqu'à 720 kilomètres, et au maximum à 2160 kilomètres.

D'après ce dernier observateur, les granules, dans les parties du disque libres de taches, se groupent quelquefois en amas, en bandes, séparés les uns des autres par de plus larges intervalles, formant une sorte de mosaïque irrégulière. La figure 28 représente l'aspect d'une de ces curieuses dispositions : on y remarque une longue boucle ovale formée de trois rangs de granules, à l'intérieur de laquelle d'autres grains lumineux sont çà et là disséminés.

Dans le voisinage des taches, sur les bords et sur les fonds des pénombres, les grains de riz offrent un autre caractère. Leur forme s'allonge, comme s'ils étaient attirés et pressés par la tache; on les voit le plus souvent converger en files nombreuses vers le noyau; d'autres fois, ils sont enchevêtrés les uns dans les autres de toutes les façons. Le directeur de l'Observatoire romain, après avoir décrit l'aspect du disque, en distingue ainsi la structure des pénombres : « On voit surtout une grande quantité de corps blancs allongés, qui, se plaçant à la suite les uns des autres, produisent comme des filaments, et c'étaient ceux-ci que j'avais nommés *courants* dans mes observations antérieures. Cette configuration cependant n'est pas constante, et les corps blancs ne sont pas toujours séparés dans les pénombres. Il est difficile de trouver un objet auquel les comparer : je les comparerai à des amas de coton allongés, de toutes les formes imaginables, quelquefois enchevêtrés les uns aux autres, quelquefois aussi dispersés et isolés. »

La planche III donnera une idée très-nette de la disposition des granules à l'intérieur des pénombres, et l'on comprendra fort bien pourquoi M. Nasmyth leur a donné la dénomination

de feuilles de saule, que d'autres observateurs, il faut le dire, ont eu quelque peine à distinguer. Cette planche est la reproduction d'un dessin original que M. Nasmyth a eu l'obligeance de nous communiquer. On y voit tous les détails de structure d'un groupe de taches solaires : les noyaux, formés de deux teintes superposées; l'une, complétement noire, est comme le fond du gouffre; l'autre, un peu moins foncée, semble indiquer en ces points une moindre profondeur; tout autour règne la pénombre recouverte ou plutôt formée entièrement de feuilles de saule rangées en files convergeant vers les noyaux; les unes, plus brillantes, les autres plus sombres, paraissent également être la continuation des pores qui criblent la surface lumineuse environnante. Quelques-unes, isolées, sont comme suspendues au-dessus de l'abîme, tandis que d'autres, enchevêtrées en files, forment un pont reliant les deux talus opposés.

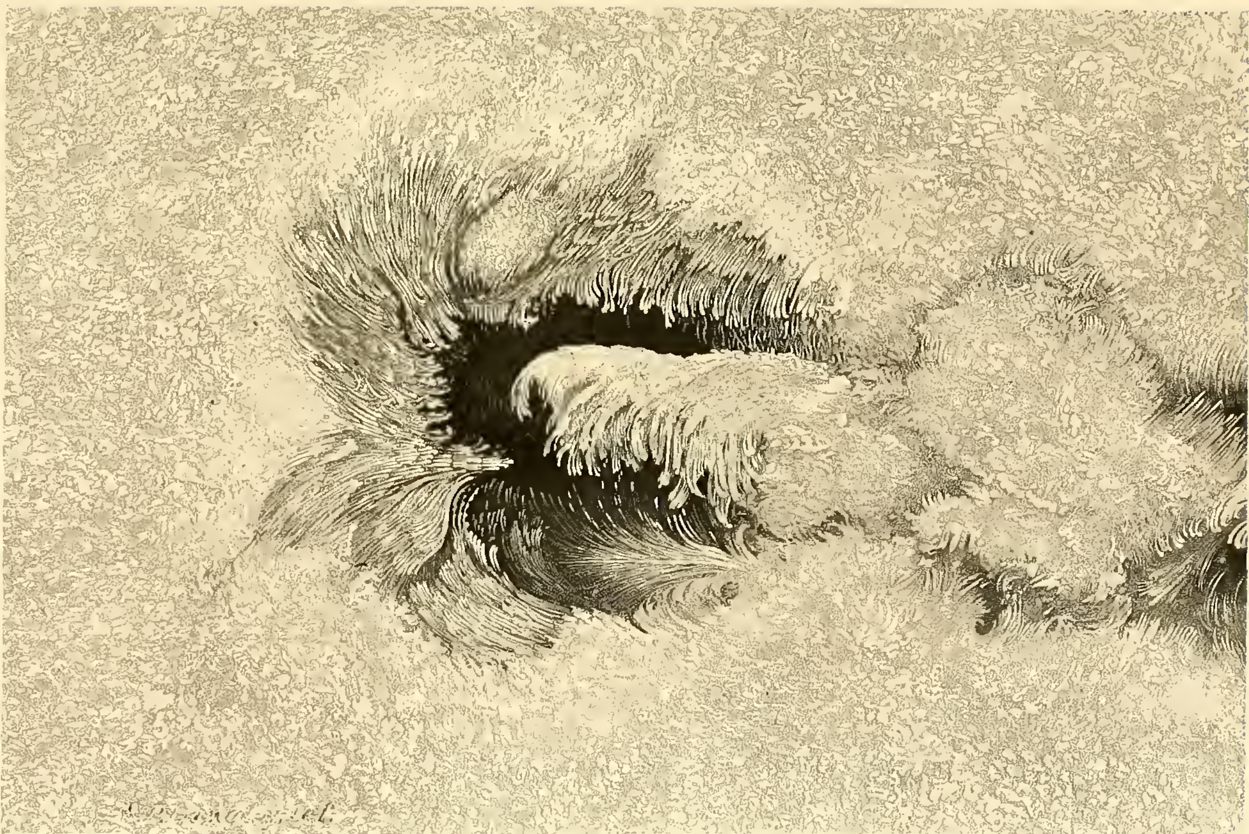
Tout récemment, une étude approfondie, faite avec des moyens plus puissants, a jeté un nouveau jour sur la structure réticulée de la photosphère, sur la forme, la disposition et les dimensions des granules soit en dehors, soit à l'intérieur, soit dans le voisinage des taches. C'est à M. Langley, directeur de l'Observatoire d'Allegheny, qu'est due cette étude, favorisée par l'emploi d'une lunette de 13 inches ($0^m,33$) d'ouverture, munie d'un oculaire polarisé.

Suivant M. Langley, les grains de riz (*rice-grains* de Stone) ne sont pas réellement aussi juxtaposés, aussi voisins les uns des autres qu'ils le semblent au premier abord. Des mesures précises lui ont fait reconnaître que les grains de riz ne sont pas, en réalité, des objets individuels d'un diamètre à peu près uniforme. Un fort grossissement les résout chacun en éléments plus petits, jusqu'ici à peine observés. C'est à ces éléments que l'astronome américain réserve le nom de *granules*. Les *granules* sont de très-petits corps, présents sur toute la surface photosphérique, bien que difficiles à discerner dans les facules. Dans les pénombres des taches, ils s'éten-



TACHES SOLAIRES.

Feuilles de saule des noyaux et des pénombres observées le 5 juin 1861, par J. Nasmyth.



Imp. Goupil & Cie Photogravure Goupil & Cie

STRUCTURE D'UNE TACHE SOLAIRE.

Éléments de la pénombre et du noyau

Fac-Simile d'un dessin de S.P. Langley D^r de l'Observatoire d'Allegheny (U.S.A.)

dent en longs filaments donnant aux pénombres l'aspect que M. Dawes a caractérisé par le mot *thatch straws*. Agrégés hors des taches, ils forment les *rice-grains*, réunis par deux, par trois et jusqu'à dix au plus. Le fond général sur lequel se détachent ces particules brillantes est d'un gris sombre légèrement pommelé.

M. Langley évalue à $0'',3$ ou $0'',4$ le diamètre moyen des granules, qu'il ne faut confondre, répétons-le, ni avec les grains de riz de Stone, ni avec les feuilles de saule de Nasmyth ou les granulations d'Huggins, dont on a vu quelles sont les dimensions : les mesures de Secchi concordent au contraire avec celles de l'astronome américain, et ainsi semblent se rapporter aux mêmes objets. De ces mesures et de l'évaluation de leur nombre sur une aire donnée, il déduit cette conclusion assurément imprévue : « La lumière du Soleil (qui n'est autre que celle des points brillants en question) vient principalement d'une petite portion de sa surface, qu'on peut évaluer au cinquième au plus de sa surface totale. »

M. Langley a étudié spécialement la forme et la direction des granules, tels qu'ils se présentent au sein des taches, dans les pénombres et jusqu'au fond des noyaux, où on les aperçoit étirés en forme de filaments diversement recourbés. Cette étude l'a convaincu que les bords plus sombres de la pénombre sont l'indice d'une rupture des éléments, qui s'est produite par un effort latéral ou descendant, tandis que la partie centrale plus brillante de la pénombre vient d'un relèvement des extrémités des filaments. Quant à la structure du noyau, elle présente elle-même l'apparence de la pénombre submergée, et jusqu'aux noyaux les plus noirs semblent constitués par des bancs profonds de filaments.

Ces résultats d'un si haut intérêt peuvent être suivis par le lecteur, en se reportant au dessin que nous donnons d'une tache solaire et de sa structure, d'après la planche publiée par M. Langley. Nous n'avons pas besoin de faire ressortir l'im-

portance de ces observations nouvelles. Elles montrent les taches, leurs pénombres et leurs noyaux, les facules qui les entourent, composées d'éléments similaires, modifiés seulement par les causes inconnues qui produisent les accidents divers ou les mouvements de la photosphère.

De tous les faits passés en revue dans ce chapitre, on peut conclure que la surface visible du Soleil ou photosphère n'est pas une surface lisse et continue, également lumineuse en tous ses points; qu'elle est au contraire partout composée de masses brillantes analogues, au moins par l'aspect, aux cumulus de notre atmosphère, reposant sur un fond notablement plus sombre; que ces pores ou intervalles grisâtres s'élargissent parfois de manière à prendre l'apparence de très-petites taches les unes noires, les autres grises, c'est-à-dire ou noyaux ou pénombres, et que celles-ci, à leur tour, donnent naissance aux grandes taches. Il paraît aussi certain que les taches brillantes ou facules ne sont autre chose qu'une accumulation de granules lumineux plus serrés.

Mais il reste toujours à savoir quelle est la nature physique de ces divers éléments de la photosphère, si la matière lumineuse est solide ou fluide, et si les taches, comme l'étude télescopique en suggère l'idée, sont des enfoncements de la photosphère, des parties superficielles ou des masses surplombantes. On verra plus loin quelles hypothèses ont été proposées pour l'explication de ces divers phénomènes.

IV

LES TACHES DU SOLEIL.

§ 1. DISTRIBUTION DES TACHES A LA SURFACE DU SOLEIL.

Les taches ne se montrent pas indistinctement dans toutes les régions du globe solaire. On n'en voit jamais aux pôles ni dans les parties voisines des pôles. Dès l'origine, les observateurs reconnurent qu'elles ne dépassaient pas certaines limites de part et d'autre de l'équateur du Soleil. Galilée donnait 29° comme limites de la zone dans chaque hémisphère; Scheiner et Hévélius, 30°. C'est là, selon l'expression de Scheiner, la fameuse *zone royale;* par cette singulière flatterie à l'adresse des souverains de son temps, le jésuite d'Ingolstadt considérait ainsi les taches comme un privilége monarchique.

Mais l'étendue de la zone s'élargit à mesure que les observations s'accumulèrent. Ainsi, Messier vit en 1777 une tache à 31° 1/2 de l'équateur solaire; Méchain et Lalande une autre en 1780, dont la latitude atteignait 40°; vers 1840, Laugier en observa plusieurs à 41°. Un groupe, vu par R. C. Carrington en juillet 1858, était situé à 45° de latitude australe. Les exemples de taches plus éloignées encore de l'équateur sont très-rares : citons la tache observée par Schwabe à 50°, une

autre par Peters (d'Hamilton college) à 50° 55′, et enfin la tache décrite par La Hire sous 70° de latitude nord, et qui, comme Humboldt l'observe avec raison, « peut être mise au rang des plus grandes raretés ».

Du reste, les taches solaires sont loin de se distribuer uniformément dans la zone d'apparition dont on vient de donner les limites. Si l'on n'en voit jamais aux pôles, et fort rarement au delà de 40° de latitude, elles sont aussi assez peu fréquentes à l'équateur même, et à quelques degrés de chaque côté de cette ligne. Pour en donner une idée, citons quelques nombres. Dans les 5290 observations de Carrington, se rapportant à 954 groupes de taches, nous trouvons 50 groupes dans le voisinage de l'équateur; 20 entre 0° et + 4° de latitude ; 30 entre 0° et — 4° ; une seule coupe réellement l'équateur. Les autres groupes se distribuent à peu près ainsi : environ 200 depuis ± 4° jusqu'à ± 10° ; 640 sont compris de ces deux latitudes jusqu'à 30° au nord et au sud; au delà, il n'y en a plus qu'une soixantaine. C'est bien entre 10° et 30° que les taches se montrent en plus grande quantité, comme on peut en juger du premier coup d'œil par le diagramme de la planche V (page 107), reproduction sur une petite échelle de trois planches de l'ouvrage de Carrington.

D'après John Herschel, « l'équateur actuel du Soleil est moins fréquemment recouvert de taches que les zones adjacentes de chaque côté, et il existe une différence caractéristique entre le nombre de leurs dimensions dans les deux hémisphères nord et sud, les taches boréales l'emportant sur les taches australes sous ces deux rapports. La zone comprise entre 11° et 15° de latitude nord est particulièrement fertile en taches de grandes dimensions et d'une longue durée. » En regard de cette opinion qu'Humboldt reproduit dans le *Cosmos*, il est bon de placer les nombreuses observations de Carrington, qui, sur 954 groupes de taches, en placent 436 dans l'hémisphère nord, et 518 dans l'hémisphère sud. Ce

résultat contredit, du moins au point de vue de la fréquence ou du nombre, l'assertion des deux illustres savants cités plus haut, et, à en juger par les dessins qui accompagnent le bel ouvrage de Carrington, les grandes taches semblent avoir été également nombreuses dans chaque hémisphère. Mais il ne faut pas oublier qu'il s'agit d'époques différentes ; peut-être y a-t-il des périodes où l'un des hémisphères l'emporte, et d'autres où c'est le contraire qui arrive.

En résumé, on voit que les taches solaires se distribuent, en latitude, en deux zones principales qui, de part et d'autre de l'équateur, embrassent vingt degrés, entre 10° et 30°. Entre ces deux zones existe une ceinture équatoriale de vingt degrés où les taches sont plus rares. Passé 30° de latitude nord et sud, elles sont de plus en plus rares, et l'on peut considérer les régions qui s'étendent de 45° jusqu'aux pôles, comme à peu près dépourvues de taches.

Maintenant, les taches affectent-elles de préférence certaines régions, dans le sens de la longitude ? Nous ne connaissons aucune observation qui puisse justifier une telle conjecture, sauf celle que cite Humboldt, dans son *Cosmos* : « Sœmmering, dit-il, remarque qu'il y a sur le Soleil certains méridiens dans lesquels, pendant de longues années, il n'a pas vu apparaître une seule tache. »

§ 2. PÉRIODE UNDÉCENNALE DES TACHES SOLAIRES.

On vient de voir comment les taches se distribuent à la surface de l'astre ; il reste à voir si, au point de vue du nombre et des dimensions, elles présentent une certaine régularité dans la suite des années.

Dès l'origine des observations, les astronomes ont signalé de grandes différences dans la fréquence des taches, selon les

époques. Tantôt elles se sont montrées avec abondance, tantôt elles ont été extrêmement rares. Citons quelques exemples de ces variations pendant les deux siècles qui ont suivi la découverte des taches solaires.

Scheiner parle de 50 taches vues à la fois sur le disque, en 1711. De 1700 à 1710, elles furent nombreuses aussi; en 1716, on observa 21 groupes, parmi lesquels 8 étaient distinctement visibles à la fois. De 1717 à 1720, on en vit encore davantage, et en 1719 notamment, il y avait une véritable ceinture équatoriale de taches. En 1740, en octobre 1759, elles furent encore très-fréquentes. Schrœter observa une fois 68 taches visibles, puis à une autre époque 81 taches. W. Herschel en vit 50 en 1801, 40 en novembre 1802.

La figure 29 montre combien parfois les taches sont nombreuses au même instant sur le disque, tout en présentant des dimensions considérables.

D'autre part, il paraît qu'elles furent très-rares de 1650 à 1670, de 1676 à 1684. On n'en vit point de 1695 à 1700, de 1711 à 1712. En 1710 et en 1713, on n'en vit qu'une seule. D'après la Correspondance astronomique du baron de Zach, 29 mois se passèrent, de 1821 à 1823, sans qu'on observât de taches; le 10 juillet 1823, seulement, on en vit apparaître de nouvelles.

Mais jusque-là, on ne soupçonnait point qu'il y eût dans la plus ou moins grande fréquence des taches solaires, autre chose qu'un phénomène accidentel et irrégulier. Le premier astronome qui chercha à comparer à ce point de vue les observations, fut M. Schwabe de Dessau, qui explora le Soleil pendant 24 années consécutives, de 1824 à 1850, et reconnut une périodicité manifeste dans la fréquence des taches. Soit qu'il énumérât le nombre des groupes de taches visibles sur le disque, soit qu'il comptât le nombre des jours de chaque année où le Soleil parut dépourvu de taches, ce savant trouva que le maximum tombait dans les années 1828, 1837, 1848,

et le minimum dans les années 1833 et 1843 : c'est une moyenne de dix ans d'intervalle entre les maxima ou entre les minima des taches. Les observations faites de 1853 à 1861 par M. Carrington à Redhill, donnent un minimum en 1856 et un maximum en 1860, comme il est aisé de s'en assurer par la simple vue à l'inspection de la planche V. Ce résultat, joint à celui de Schwabe, donnerait une période un peu plus longue.

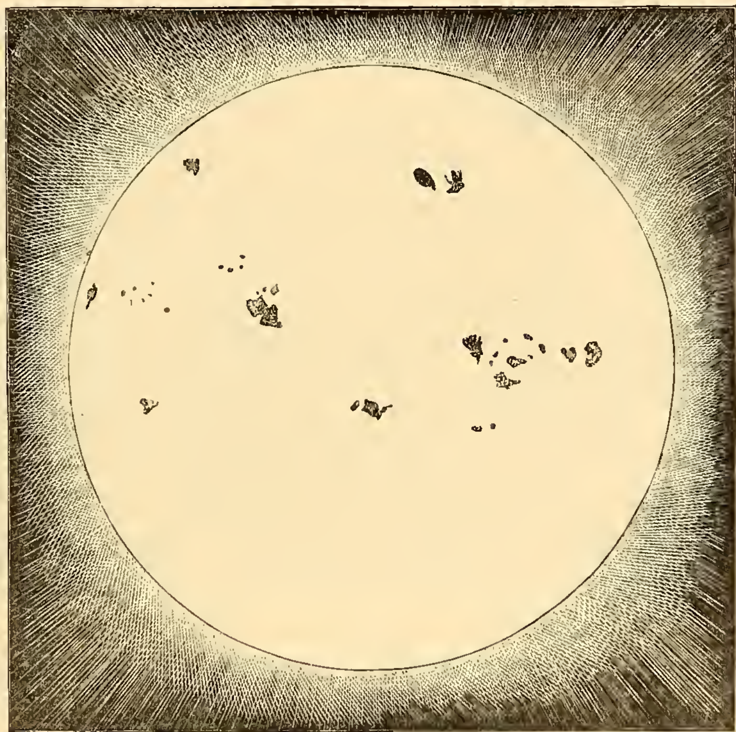


Fig. 29. Taches du Soleil, le 2 septembre 1839, d'après le capitaine Davis.

Ces recherches ont été, dès 1847, continuées par d'autres astronomes[1]. M. R. Wolf (de Zurich) a compulsé toutes les ob-

1. Il faut citer notamment les observations faites à Kew, sous la direction de M. Warren de la Rue. Le Soleil, photographié jour par jour, permettait de voir non-seulement le nombre des taches ou plutôt des groupes de taches, mais encore, méthode plus rationnelle, d'évaluer la superficie totale des taches et de leurs pénombres. Les séries de surface obtenues ainsi s'accordent du reste à donner les mêmes maxima et minima que les autres.

servations de taches enregistrées depuis leur découverte en 1610 jusqu'à nos jours. Il a pu donner ainsi un tableau complet des époques où ont eu lieu les maxima et les minima de fréquence, jusqu'à l'année 1870. Ce document est trop important pour ne pas trouver ici sa place :

TABLEAU DES ANNÉES DES MAXIMA ET DES MINIMA DES TACHES SOLAIRES.

Époques des minima.			Époques des maxima.		
1610.8	1698.0	1784.8	1615.5	1705.5	1789.0
1619.0	1712.0	1798.5	1626.0	1718.2	1804.0
1634.0	1723.5	1810.5	1639.5	1727.5	1816.1
1645.0	1734.0	1823.2	1649.0	1738.7	1829.5
1655.0	1745.0	1833.8	1660.0	1705.0	1837.2
1666.9	1755.5	1844.0	1675.0	1761.5	1848.6
1679.5	1766.5	1856.2	1685.0	1769.9	1860.2
1689.5	1775.8	1867.2	1693.0	1779.5	1870.7

Il résulte de ce tableau deux conséquences : la première, que la durée d'une période comprise, soit entre deux maxima, soit entre deux minima, est à peu de chose près égale à 11 ans et $\frac{1}{9}$; la seconde, que les époques où les taches sont le moins nombreuses ne tombent pas au milieu de l'intervalle qui sépare les maxima. Du minimum au maximum suivant, il y a en moyenne 3^{ans},7, de sorte que la recrudescence se fait beaucoup plus rapidement que la décroissance. Une courbe qui, comme celle de la figure 30, représente le phénomène, est plus abrupte de son point le plus bas au point le plus élevé suivant.

Du reste, selon les conclusions de M. Wolf, le phénomène, outre la période undécennale principale en présente deux autres, l'une de 55 ans et demi, l'autre de 166 années. Mais il faudra ajouter aux observations antérieures, qui n'embrassent que 265 ans, de longues séries d'observations nouvelles, pour établir solidement les lois de ces variations intéressantes. Elles sont intéressantes par elles-mêmes, et aussi par le problème qu'elle soulève sur les causes qui donnent lieu à ces alterna-

tives d'agitation et de calme dans la photosphère solaire : ces causes sont-elles intérieures et immédiatement dépendantes de la constitution physique du Soleil, ou bien ont-elles une origine extérieure? Nous allons voir d'ailleurs qu'il existe une liaison bien singulière entre les variations dont il s'agit et des phénomènes de météorologie terrestre.

Auparavant disons deux mots seulement d'un rapport que W. Herschel, guidé par certaines idées théoriques sur la

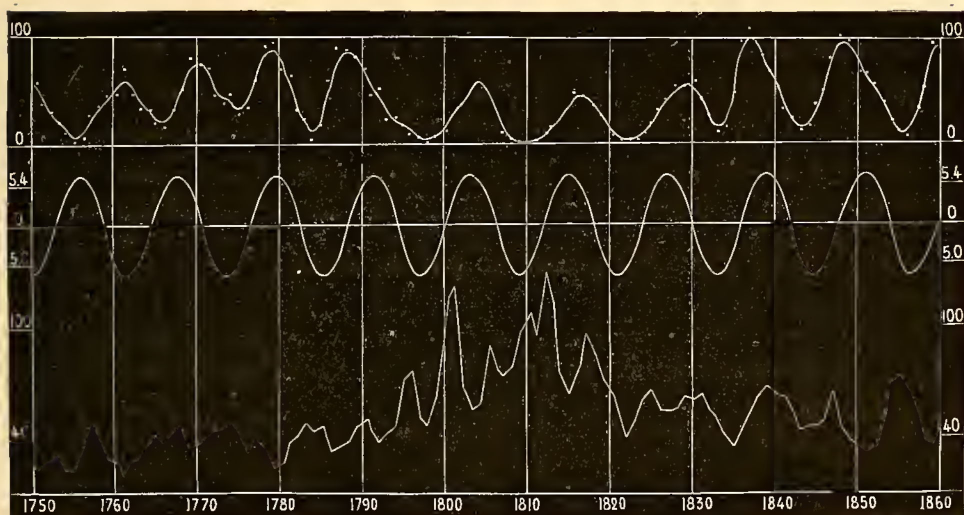


Fig. 30. Courbes représentant 1° les variations des nombres des taches depuis 1750 jusqu'à 1860; — 2° les variations des distances de Jupiter au Soleil (de 5.0 à 5.4); — 3° les variations du prix du blé.

constitution du Soleil, avait cru exister entre les taches du Soleil et la température de la Terre. Il pensait que les taches sont l'indice d'une augmentation dans l'émission de chaleur des régions de la surface solaire où elles se montrent. Si une telle supposition est fondée, dans les années où les taches sont nombreuses, la radiation du Soleil doit être plus intense et la température terrestre plus élevée. L'illustre astronome voulut, en l'absence de documents plus précis, prendre pour

terme de comparaison les variations du prix du blé en Angleterre. Mais les recherches faites depuis dans ce sens par Gautier (de Genève), Arago et Barral, se trouvent en contradiction avec l'hypothèse d'Herschel (voy. les courbes de la fig. 30). C'est une question à étudier par d'autres moyens.

Une corrélation plus certaine est celle qui lie la fréquence des taches solaires avec les perturbations de l'aiguille aimantée, notamment avec l'amplitude de la variation diurne de la déclinaison magnétique. Cette liaison, découverte presque simultanément, en 1852, par Sabine, Gautier, Wolf, semble aujourd'hui hors de contestation. Elle a été du reste étendue à un phénomène météorologique qui est lié lui-même au magnétisme terrestre, c'est-à-dire à la plus ou moins grande fréquence et intensité des aurores boréales. Le tableau suivant, dû à un savant américain, M. E. Loomis, suffit pour mettre en évidence la coïncidence des époques de maximum et de minimum pour ces trois ordres de phénomènes :

TABLEAU DES ANNÉES DES MAXIMA ET DES MINIMA DES TACHES SOLAIRES, DES AURORES POLAIRES ET DE LA VARIATION MAGNÉTIQUE DIURNE.

Époques des maxima.			*Époques des minima.*		
Taches solaires.	Déclinaison magnétique.	Aurores polaires.	Taches solaires.	Déclinaison magnétique.	Aurores polaires.
1778	1777	1778	1784	1784	1784
1788.5	1787	1787.5	1798	1799.5	1798
1804	1803	1804.5	1810	manque	1811
1816.5	1817.5	1818	1823	1823.5	1823
1829.5	1829	1830	1833.5	manque	1834.5
1837	1838	1840	1843.5	1844	1843.5
1848.5	1848.5	1850.5	1856	1856	1856
1860	1859.5	1859.5	1867	1867	1867
1870	1870.5	1870.5	...	...	...

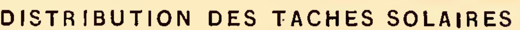
On verra plus loin quelles hypothèses ont été faites pour expliquer une relation physique entre des phénomènes qui se passent sur des théâtres si éloignés l'un de l'autre. Mais, désormais, il n'est guère possible de nier la connexion qui les

LATITUDES BORÉALES AUSTRALES

1853 1854 1855 1856 1857

40° 30° 20° 10° 0° 10° 20° 30° 40°

1857 1858 1859 1860 1861



DISTRIBUTION DES TACHES SOLAIRES

Selon la latitude, pendant les années 1853 à 1861. D'après R. C. Carrington.

unit. M. R. Wolf est arrivé à calculer, à l'aide d'une formule empirique, où entrent comme variables le nombre des taches et la variation diurne magnétique, les moyennes mensuelles de cette variation en divers lieux; or les tableaux résultant de cette prévision donnent, entre la variation observée et la variation calculée, de remarquables concordances, « concordances frappantes, dit à ce sujet M. Faye, qui permettent de lire sur les taches du Soleil, comme sur l'échelle divisée d'une aiguille aimantée[1]. »

On a cherché enfin si les variations périodiques du nombre des taches solaires ne sont pas en rapport avec les positions qu'occupent les diverses planètes, Jupiter, Mars, Vénus, etc. Selon R. Wolf, l'attraction des masses planétaires doit produire dans la surface fluide du Soleil des mouvements analogues à ceux des marées terrestres, et ces mouvements seraient de nature à influer sur le nombre et l'étendue des taches. La période de 12 années qui ramène successivement Jupiter à son périhélie, à son aphélie, à sa moyenne distance, parut d'abord établir une liaison entre les positions de cette planète, dont la masse est si considérable, et les maxima et les minima des taches. Mais la comparaison des courbes de va-

1. Donnons un exemple unique de ces coïncidences. Le tableau suivant est relatif à Batavia (île de Java), pour l'année 1868 :

1868	Nombre des taches.	Variation observée.	Variation calculée.
Janvier	19.3	2'56	2'49
Février	21.5	2'56	2'53
Mars	24.2	2'56	2'58
Avril	27.6	2'58	2'64
Mai	31.7	2'62	2'72
Juin	35.5	2'71	2'79
Juillet	39.2	2'81	2'85
Août	42.9	2'92	2'92
Septembre	45.8	3'01	2'98
Octobre	47.0	3'04	3'00
Novembre	50.4	3'08	3'06
Décembre	56.9	3'19	3'18

riations (voy. la figure 30) montre des divergences trop fortes, pour qu'il soit possible de voir entre ces éléments des relations directes. Cependant, les recherches faites à cet égard sur Jupiter, Vénus, Mars, la Terre, par MM. Warren de la Rue, B. Stewart et Lœwy, semblent indiquer une réelle influence de ces corps célestes sur le nombre des taches et leur position en latitude. C'est une étude qui demande à être continuée.

V

L'ATMOSPHÈRE DU SOLEIL.

§ 1. PHÉNOMÈNES OBSERVÉS DANS LES ÉCLIPSES TOTALES.

Le télescope a suffi pour l'investigation de tout ce qui peut se voir à la surface du Soleil, c'est-à-dire à la surface de son enveloppe rayonnante, la photosphère : taches sombres, avec leurs pénombres et leurs noyaux, taches brillantes ou facules, granulations photosphériques.

Mais le Soleil se termine-t-il à la photosphère ? N'est-il point enveloppé d'une atmosphère extérieure qui, par sa transparence, laisse voir le globe rayonnant, mais ne peut elle-même déceler sa présence, masquée d'un côté par l'éclat éblouissant de l'astre, de l'autre, c'est-à-dire au dehors du disque, par l'illumination de notre propre atmosphère ? Il eût été difficile de répondre à ces questions autrement que par des conjectures, sans une circonstance, assez rare à la vérité, mais d'autant plus importante, celle d'un phénomène qui détruit momentanément l'éclat du disque solaire et aussi l'illumination atmosphérique, permettant ainsi d'explorer librement les régions voisines du bord.

Ce phénomène est celui d'une éclipse totale de Soleil.

Quand le disque obscur de la Lune vient à passer au devant du disque solaire, l'échancrant d'abord peu à peu, puis

le masquant tout entier, une large région de notre atmosphère se trouve plongée dans le cône d'ombre lunaire. Il se fait alors, pendant la courte durée de la disparition de toute la lumière du Soleil, ou, comme l'on dit, de la *totalité*, une obscurité, une nuit relative, très-favorable à l'étude de la portion du ciel qui environne immédiatement le contour de la Lune ou celui du Soleil.

Des phénomènes remarquables ont été ainsi révélés aux astronomes.

Le premier, connu depuis longtemps parce qu'il s'aperçoit à la vue simple, est l'auréole lumineuse dont le disque de la Lune se voit entouré pendant une éclipse. Cette auréole consiste en une lueur ordinairement blanche, assez vive sur le contour lunaire, et se dégradant insensiblement jusqu'à une distance qui atteint quelquefois le diamètre solaire : c'est ce qu'on appelle la *couronne*. Assez fréquemment, il se détache de la couronne des rayons lumineux inégaux, irrégulièrement distribués sur son contour, et figurant assez bien l'espèce d'auréole dont les peintres de tableaux religieux entourent les têtes des saints, ce qu'en style d'atelier on nomme une *gloire* (voy. les figures 31 à 34).

Un autre phénomène non moins curieux est celui que les astronomes désignent généralement sous le nom de *protubérances*. Ce sont des taches d'une teinte rougeâtre ou rose, de formes ou de dimensions très-variées, contiguës au bord du disque de la Lune ou très-voisines de ce bord. Elles n'ont été vues ou du moins sérieusement étudiées qu'à partir de l'éclipse totale de 1842. Cependant, un astronome suédois, Vassenius, observant à Gotheborg l'éclipse du 2 mai 1733 (v. st.), avait évidemment reconnu déjà ces taches singulières, comme il résulte d'une note insérée dans les *Transactions philosophiques*[1] ;

1. Dans cette note, l'observateur mentionne « trois ou quatre taches rougeâtres qui apparurent dans l'*atmosphère de la Lune* (sic), au delà du con-



Imp. Goupil et Cie. *Photoglyptie Goupil et Cie.*

PHOTOGRAPHIE DU DISQUE SOLAIRE

Taches et Facules

Epreuve obtenue d'après une photographie de M. J. Janssen, de 204 millimètres de diamètre.

mais cette observation est restée inaperçue pendant plus d'un siècle.

Ces deux phénomènes, la couronne et les protubérances, ont été, depuis 1842, l'objet d'une étude assidue, que justifie bien, ainsi qu'on va le voir, l'importance du rôle qu'ils jouent dans la constitution physique du Soleil. Commençons par les décrire d'après les observations faites pendant les éclipses totales; nous suivrons ensuite les protubérances dans leurs incessantes transformations, chose qu'on aurait pu croire impossible, si une admirable méthode n'était venue les mettre, jour par jour, à la discrétion des astronomes.

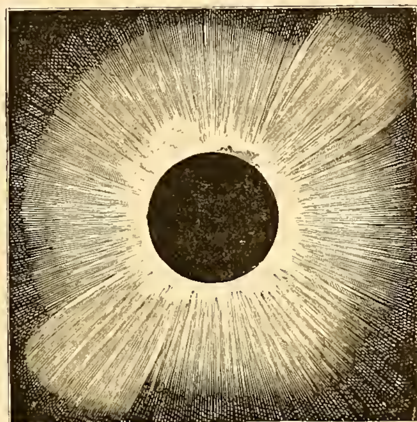


Fig. 31. Éclipse totale du 8 juillet 1842. Couronne, gloire et protubérances.

§ 2. LA COURONNE.

Les premières éclipses où l'on ait étudié scientifiquement la couronne sont celles du siècle dernier, en 1706, 1715, 1724 et 1778[1].

tour du disque. Une de ces taches, plus considérable que les autres, était composée de trois parties ou nuages plus petits, parallèles, d'une longueur inégale et un peu inclinés à la circonférence de la Lune.

1. Arago, dans l'Annuaire de 1842, cite l'éclipse totale de l'an 98, à propos de laquelle Plutarque disait que « la Lune laisse déborder autour d'elle, dans les éclipses, une partie du Soleil, ce qui diminue l'obscurité. » Puis, l'éclipse de 1567, qu'on crut annulaire parce qu'un anneau lumineux entourait la Lune au plus fort du phénomène. Képler ne douta point qu'il s'agit d'une éclipse totale, expliquant l'anneau soit par l'éther enflammé qui entoure le Soleil, soit par la réfraction des rayons solaires dans l'atmosphère de la Lune. Enfin, en 1598 et 1605, on observa pareillement un anneau lumineux au moment de la totalité.

En 1706, Plantade et Clapiès, observant à Montpellier, virent autour du disque obscur de la Lune un anneau également lumineux d'environ 3′ de largeur; au delà, une faible lueur décroissante s'étendait à une distance de 4 degrés du centre. Halley et Louville observèrent l'éclipse totale de 1715. D'après Halley, un anneau lumineux de 2′ à 3′, d'un blanc pâle, lui parut centré sur la Lune, d'où cet observateur tira la conséquence que c'était l'atmosphère lunaire; il n'émit toutefois cette hypothèse qu'avec réserve. Louville peint la couronne comme une lumière argentée, plus vive au bord lunaire et diminuant graduellement d'intensité; dans le sens des rayons, se remarquaient des interruptions donnant au phénomène l'aspect d'une gloire.

Maraldi, observant l'éclipse de 1724, décrit la couronne comme non centrée sur la Lune; plus large à l'Orient au commencement de la totalité; à la fin, au contraire, plus large à l'Occident. En 1778, don A. de Ulloa donnait 5′ à 6′ de largeur à la couronne, d'où partaient des rayons lumineux, longs comme le diamètre lunaire et paraissant animés d'un mouvement de rotation. D'après Ferrer, qui observa l'éclipse totale du 18 juin 1806, l'anneau lumineux, d'un blanc de perle, de 6′ de largeur formant la couronne, était centré sur le Soleil. Des rayons en partaient jusqu'à 3 degrés de distance.

A partir de 1842, les astronomes prévenus par les phénomènes antérieurement observés et par une notice de François Arago, étudièrent avec plus de soin les particularités relatives à la couronne. Dans le midi de la France, au nord de la péninsule italique, en Russie, de nombreux observateurs s'accordèrent à distinguer deux zones lumineuses différentes, d'une part un anneau de faible largeur (2′ à 4′) et de vive lumière, qui parut entourer la Lune, et d'autre part la couronne proprement dite, sillonnée de rayons et d'aigrettes lumineuses qui prolongent le phénomène à une distance assez grande; cette dernière auréole de 10′ à 16′ suivant les uns,

atteignit de 3 à 4 degrés d'étendue selon les autres (Otto Struve à Lipesk). Quant à la couleur, certains la virent jaunâtre; d'autres d'un blanc laiteux. En Russie, où le phénomène fut observé dans les conditions les meilleures, la couronne intérieure parut d'un blanc éblouissant; les rayons lumineux qui s'en échappaient semblaient dans un état continuel d'agitation, observation déjà faite en 1778, par Ulloa.

Onze éclipses totales[1] ont été observées depuis 1842, et les phénomènes qu'on vient de décrire ont été étudiés dans leurs moindres détails. Mais, malgré les divergences qu'on y remarque, lesquelles peuvent provenir soit des époques différentes où l'observation a eu lieu, soit des stations et des conditions atmosphériques propres aux lieux et aux saisons, dans toutes les descriptions se retrouvent ces trois faits principaux : en premier lieu, l'existence autour du disque obscur de la Lune d'une zone de lumière très-vive et également lumineuse jusqu'à sa limite, qui varie entre 3′ et 6′ au delà du limbe; c'est dans la partie inférieure de cette zone que se voient les protubérances; en second lieu, une seconde zone d'une lueur plus faible et se dégradant insensiblement jusqu'à une distance qui peut atteindre le diamètre solaire; enfin des rayons séparés par des intervalles obscurs, tantôt rectilignes, tantôt courbés, aigrettes ou panaches de formes variées, les uns semblables à des feuilles ou pétales

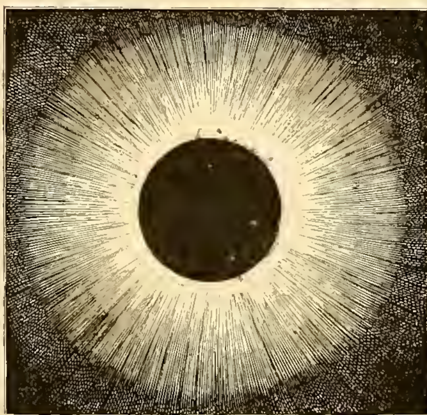


Fig. 32. Éclipse totale du 28 juillet 1851, d'après Dawes.

1. Celles de 1851, 1858, 1860, 1865, 1867, 1868, 1869, 1870, 1871, 1874, 1875.

de dahlias (éclipses de 1858 et de 1871), les autres à des écheveaux de fils embrouillés (1842).

Il restait à interpréter ces phénomènes.

Trois hypothèses principales se présentaient et ont été successivement émises. La première et la plus ancienne regardait la couronne comme ayant sa cause dans une atmosphère de la Lune qu'illuminaient, pendant la totalité, les rayons solaires, et que nous apercevions de la Terre, par voie de réfraction ou de réflexion. Képler, Halley émirent cette idée en faisant leurs



Fig. 33. Éclipse totale de Soleil du 7 septembre 1858. Aigrettes en forme de feuilles, d'après Liais.



Fig. 34. Éclipse totale du 18 juillet 1860. Aigrettes, gloire et couronne, d'après Feilitzsch.

réserves toutefois, et l'hypothèse fut longtemps considérée comme véritable.

Une seconde supposition est celle qui considère la couronne comme un phénomène ayant uniquement son siége dans l'atmosphère terrestre ; ce serait une sorte de halo résultant principalement de la diffraction qu'éprouveraient les rayons du Soleil en rasant les bords de la surface de la Lune. Ces bords étant dentelés par les montagnes et les vallées lunaires, il en résulterait des rayons divergents et inégalement distribués autour du disque.

La troisième hypothèse — que Képler avait également en-

trevue — fait de la couronne un phénomène propre au Soleil. C'est une enveloppe ou atmosphère lumineuse entourant à distance la photosphère.

Résumons rapidement les preuves qui militent en faveur de cette dernière interprétation.

Louville et Halley avaient cru la couronne centrée sur la Lune; Maraldi la vit centrée sur le Soleil. Depuis, de nombreuses observations ont prouvé que Maraldi avait bien vu. Il est reconnu que l'aspect général de la couronne ne varie point pendant la durée d'une éclipse; on n'y remarque aucune dyssymétrie autre que celle résultant du passage d'un écran obscur, la Lune, au devant de l'objet lumineux dont cet écran découvre successivement les parties.

On verra d'ailleurs plus tard quelles sont les raisons qui prouvent que, si la Lune a une atmosphère, elle est excessivement rare et très-peu étendue, et ne pourrait assurément donner lieu au phénomène splendide de la couronne. Quant à l'atmosphère terrestre, elle joue sans doute un rôle dans l'aspect variable offert par la couronne en des lieux différents; mais elle ne peut rendre compte du phénomène lui-même [1].

Ces raisons suffisaient à faire pencher pour la troisième hypothèse, qui considère la couronne comme manifestant l'existence, autour du Soleil, d'une atmosphère particulière, dont il reste à déterminer la nature. Des preuves plus positives,

1. Dans l'éclipse de 1868, le cône d'ombre lunaire avait un diamètre de 220 kilomètres à la surface de la Terre. Au point où ce cône pénétrait dans notre atmosphère, le diamètre était au minimum de cette même dimension. Un observateur placé sur la ligne centrale devait donc, au moment du milieu de la totalité, apercevoir tout autour de la Lune un cercle obscur de ce rayon, et c'est seulement au delà que pouvait se montrer le halo dû à l'illumination atmosphérique. En assignant à l'atmosphère une hauteur de 200 kilomètres, un calcul simple donne 13° au moins pour les dimensions apparentes du rayon intérieur de ce halo, tandis que la couronne est immédiatement contiguë au limbe lunaire, et dès lors n'a qu'un rayon de 16 minutes. Une telle divergence ne peut évidemment provenir d'effets de diffraction.

tirées de l'analyse de la lumière coronale par le polariscope et le spectroscope, achèveront de nous convaincre de la réalité de cette atmosphère et nous renseigneront en même temps sur sa composition.

§ 3. LES PROTUBÉRANCES.

Arrivons aux protubérances, et voyons ce qu'on a pu apprendre de ces objets singuliers pendant les éclipses totales.

Les figures que nous donnons des diverses éclipses montrent sur le contour du limbe lunaire les apparences qu'elles ont offertes aux observateurs. Nous avons déjà rapporté ce qu'en a dit, pour la première fois, en 1733, l'astronome suédois Vassenius. Pendant l'éclipse du 8 juillet 1842, elles se sont montrées nettement à un grand nombre d'observateurs[1] qui les décrivirent, les uns comme des montagnes de couleur rose, lilas, pourpre, ayant l'aspect des pics des Alpes colorés par le Soleil couchant, les autres, comme des flammes rouges, des cônes incandescents. Petit, à Toulouse, mesura le premier l'une des protubérances qu'il trouva haute de 1′ 45″. Arago, Mauvais, Airy parlent de 1′ ou 2′; de Littrow donne aux plus élevées jusqu'à 5′ de hauteur. Plusieurs observateurs les aperçurent à l'œil nu.

Outre les protubérances isolées, on aperçut pendant cette éclipse, des couches continues d'une matière rougeâtre bordant le limbe de la Lune, irrégulièrement dentelée sur son contour. Arago, dans la notice célèbre qu'il consacra à la description de ces phénomènes importants, rappela les observations antérieures : celle de Vassenius, citée plus haut; celle de Stannyan en 1706, qui vit sur le bord de la Lune une bande rouge

1. Arago, Mauvais, Petit en France; Airy, Baily, Piola en Italie; Littrow à Vienne, etc.

couleur de sang; de Louville, en 1715, signalant dans la couronne « un cercle d'un rouge très-vif »; de lord Aberdour, pendant l'éclipse annulaire de 1717, «bande étroite d'un rouge sombre»; de Ferrer, qui parle d'une « zone offrant l'aspect de nuages éclairés par le Soleil et aussi d'une colonne déliée de fumée qui sortait de la région occidentale de l'astre.»

A partir de cette époque, on comprit qu'on était sur la voie

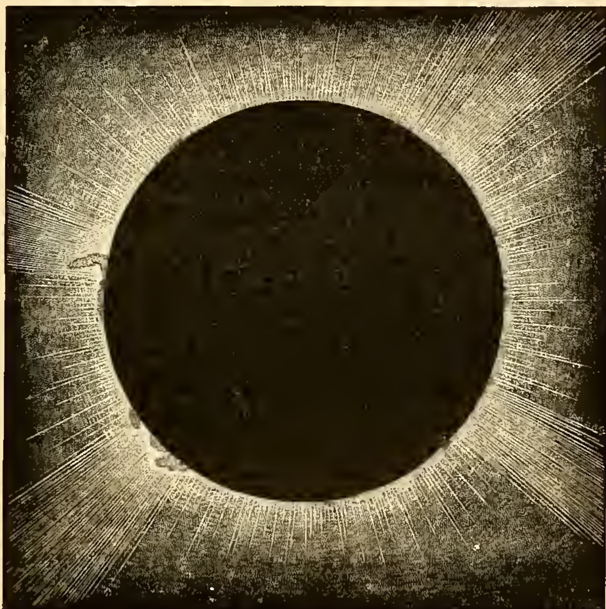


Fig. 35. Éclipse totale du 18 août 1868. Protubérances vues au commencement de la totalité. D'après les observations et les dessins du major Tennant, à Guntoor (Inde anglaise).

de découvertes du plus haut intérêt pour l'étude de la constitution physique du Soleil; les éclipses totales devinrent l'objet des recherches les plus assidues, que l'invention de nouvelles méthodes d'observations a couronnées du plus éclatant succès. On peut voir, dans les diverses figures que nous donnons ici, et dans la planche VII, représentant l'éclipse totale du 18 juillet 1860, les formes et dimensions variées des protubérances solaires. Une description plus détaillée ferait ici double emploi.

Rappelons seulement qu'à l'époque où Arago publia sa notice sur l'éclipse de 1842, les savants émirent, au sujet de la nature des protubérances, des hypothèses analogues à celles dont la couronne avait été l'objet. Étaient-ce des objets réels, appartenant au Soleil ou la Lune, ou bien de simples jeux d'optique, des objets de diffraction? La comparaison des observations d'alors, celles des éclipses subséquentes, mirent



Fig. 36. Éclipse totale du 18 août 1868. Aspect des protubérances à la fin de la totalité, d'après Tennant.

bientôt hors de doute que les protubérances étaient des phénomènes appartenant au Soleil même. Le mouvement progressif de la Lune, couvrant et découvrant successivement, dans l'ordre voulu, les sommets, les contours et les bases des protubérances, ne laissait à ce sujet aucun doute : c'est ce que démontre avec évidence les dessins de la planche VII et ceux des figures 35 et 36. La photographie, venant en aide aux observateurs, a permis de reproduire avec la plus grande fidélité, tous les détails si difficiles à dessiner pendant la





Pralon, Lith Imp Fraillery

PROTUBÉRANCES SOLAIRES

Vues pendant l'éclipse totale du 18 juillet 1860, d'après les dessins de Warren de la Rue.

courte durée d'un phénomène aussi rapide que la totalité. C'est à un savant anglais, M. Warren de la Rue, qu'est due la première application de la photographie aux éclipses, et c'est d'après les belles planches de sa notice sur l'éclipse du 18 juillet 1860, que nous avons fait reproduire un fac-simile

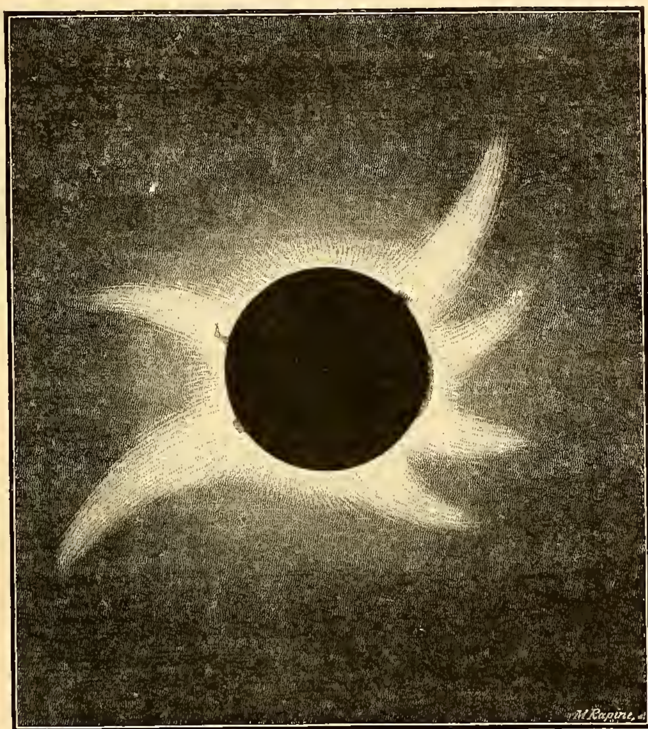


Fig. 37. Aigrettes lumineuses et protubérances de l'éclipse totale du 18 août 1868. D'après les dessins faits à Wha-Tonne par MM. Bordes et Olry. (Expédition française.)

des protubérances alors observées, à deux instants différents de l'observation (planche VII).

Mais que sont les protubérances? Sont-ce des montagnes, ou des nuages, ou des flammes?

On les considéra d'abord comme des montagnes reposant sur la photosphère, montagnes gigantesques puisque, selon les mesures prises en 1842, la plus faible évaluation eût donné une hauteur verticale de 19000 lieues. Mais il fut dès l'abord

évident que cette dénomination était impropre. Certaines protubérances ressemblaient bien à des monts surmontés de pics; mais d'autres se montraient comme des colonnes inclinées, obliques à la surface de l'astre, ou même en surplomb; d'autres encore étaient entièrement détachées, comme des nuages flottant dans l'atmosphère de la couronne [1].

Les éclipses totales de 1851, de 1858, de 1860, de 1865 ajoutèrent de nouveaux matériaux, sans permettre d'aller plus loin dans la voie des explications. Mais en 1868, la spectroscopie s'ajoutant aux investigations télescopiques et à la photographie, a fait faire un pas de plus, un pas décisif, à la question. C'est ce que nous allons voir dans le chapitre suivant.

1. Arago penchait pour l'hypothèse de nuages solaires.

VI

LA CHIMIE SOLAIRE.

§ 1. ANALYSE SPECTRALE DE LA LUMIÈRE DU SOLEIL.

La lumière du Soleil, réfractée à travers un prisme, donne, comme on sait, une bande colorée de diverses nuances : rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo et violet. C'est ce qu'on nomme le *Spectre solaire*.

Newton, en étudiant les diverses parties du spectre solaire, ne put rien distinguer qui servît de limite précise aux diverses couleurs : elles paraissaient se fondre les unes dans les autres d'une manière insensible et sans interruption apparente. Persuadé, par ses expériences, que les rayons colorés de la lumière blanche possèdent, de l'extrême rouge à l'extrême violet, tous les degrés possibles de réfrangibilité, il regardait chacun de ces rayons comme simple et homogène, et pensait que la lumière décomposée par le prisme était étalée d'une manière continue sur toute l'étendue du spectre. Jusqu'au commencement du dix-neuvième siècle, les physiciens ont admis cette continuité.

C'est en cherchant à mesurer les indices de réfraction des rayons colorés, et en s'efforçant de trouver dans le spectre des points singuliers propres à lui servir de repère, que Fraünhofer découvrit, en 1815, ce fait capital, que la lumière du

spectre solaire n'est pas continue, qu'elle est sillonnée d'une multitude de raies fines et sombres, formant dès lors autant d'interruptions brusques dans la bande lumineuse.

Il employa dans cette expérience, qui exige les précautions les plus délicates, un prisme de flint-glass d'une grande pureté, exempt de stries, sur lequel venait tomber le faisceau solaire après avoir passé par une fenêtre étroite parallèle à l'arête du prisme. Le spectre ainsi obtenu, étant observé avec une lunette qui en grossissait les dimensions, lui donna, au lieu d'une bande continue où les couleurs se fondaient sans interruption, un ruban rayé dans le sens de sa largeur d'une multitude de raies obscures et même totalement noires, très-inégalement réparties dans toute l'étendue du spectre. La distribution de ces raies ne paraissait point d'ailleurs en rapport avec les teintes des couleurs principales.

Fraünhofer varia de toutes les manières possibles son expérience; mais, tant que la source lumineuse employée fut la lumière du Soleil, soit directe, soit réfléchie, les mêmes lignes sombres apparurent toujours, conservant entre elles les mêmes rapports d'ordre et d'intensité. Si, au lieu d'un prisme de flint-glass, on se sert d'un prisme d'une autre substance solide ou liquide, les distances seules des raies varient, mais d'ailleurs elles occupent toujours les mêmes positions relativement aux couleurs du spectre.

L'illustre opticien de Munich étudia avec un soin infini ce remarquable phénomène, il fixa avec une précision extrême les positions de cinq cent quatre-vingts raies obscures, et, pour servir de point de repère et de comparaison, il distingua dans ce nombre huit raies principales, qu'il désigna par les premières lettres de l'alphabet. Les raies A, B, C se trouvent toutes les trois dans le rouge : la première à l'extrémité du spectre, la seconde au milieu du rouge, et la troisième à peu de distance de l'orangé. La raie double D forme à peu près la limite de l'orangé du côté vert; E est au milieu de cette

dernière couleur; F au milieu du bleu; G et la double raie H sont l'une à la fin de l'indigo vers le bleu, l'autre à la fin du violet.

Depuis 1817, époque à laquelle Fraünhofer découvrit les raies qui portent son nom[1], de nouvelles lignes sombres ont été observées, et l'on évalue aujourd'hui à plus de trois mille celles dont la position a été déterminée. Des raies aussi nombreuses sont difficiles à voir distinctement; il est nécessaire, pour cela, d'employer des prismes d'une grande puissance dispersive, ou des appareils formés d'une série de semblables prismes.

Fraünhofer ne se borna point à étudier les lignes qui rompent la continuité de la lumière dans le spectre solaire. Il appliqua ses belles méthodes d'observations aux spectres des autres sources de lumière. Et d'abord, comme on pouvait le pressentir, il trouva les mêmes raies dans les sources lumineuses qui renvoient par réflexion la lumière du Soleil : la lumière des nuages ou du ciel pur, celles de la Lune et des planètes. Les raies y sont, à la vérité, d'une intensité moindre. En observant les étoiles les plus brillantes, par exemple le spectre de Sirius, il trouva que ce spectre est aussi strié de raies sombres; mais ces raies, beaucoup moins nombreuses, ne sont pas distribuées de la même façon que dans le spectre solaire; d'ailleurs, elles changent aussi d'une étoile à une autre. Enfin, il appliqua la même méthode à la lumière électrique : au lieu de raies sombres, il vit dans le spectre de cette lumière un certain nombre de raies lumineuses.

Telles sont les célèbres expériences qui ont servi de point de départ à une série de brillantes découvertes, dont l'ensemble constitue aujourd'hui une des branches les plus im-

1. En 1802, le physicien Wollaston avait signalé déjà quelques-unes des raies du spectre. Fraunhofer ignorait cette observation, et a mérité, par ses études approfondies, d'être regardé comme le véritable auteur de la découverte.

portantes de l'optique, et pour la chimie, la plus ingénieuse et la plus délicate méthode d'analyse. Essayons de donner une idée de cette méthode, connue sous le nom d'*analyse spectrale*.

Le spectre donné par la lumière solaire est donc, comme on vient de le voir, sillonné de raies sombres qui indiquent des interruptions dans l'émission de la lumière et prouvent, contrairement à ce que pensait Newton, qu'il n'y a pas, dans ces sources, des rayons possédant tous les degrés possibles de réfrangibilité.

D'autres sources lumineuses donnent des résultats différents. Quand on introduit dans une flamme artificielle, par exemple dans celle d'un bec de gaz ou d'une lampe à alcool, certaines substances métalliques que la haute température de la source réduit à l'état de vapeurs, on n'observe plus de spectres continus, mais quelques raies brillantes séparées par de larges intervalles obscurs. C'est ce qu'avait déjà remarqué Fraünhofer. Depuis, le même fait a été étudié sous toutes ses faces et par diverses méthodes. On a reconnu que les raies brillantes des vapeurs métalliques varient en nombre et en position suivant la nature du métal; leur intensité varie de même avec la température; mais, de même que les raies noires du spectre solaire, elles occupent les mêmes positions relatives, dont on a déterminé la concordance avec quelques-unes des premières.

Pour étudier les spectres de cette nature, les physiciens emploient des appareils qu'ils nomment *spectroscopes*. La flamme d'une lampe à gaz est placée sur l'axe d'une lunette dans laquelle elle pénètre par une fente étroite et va rencontrer un prisme posé sur une plate-forme circulaire. Le spectre qui résulte du passage de la lumière à travers le milieu réfringent va former au foyer d'une autre lunette une image qu'on examine en mettant l'œil à l'oculaire de celle-ci.

Pour obtenir le spectre d'un métal, par exemple du sodium, on introduit dans la flamme de la lampe un fil de platine imprégné d'une dissolution concentrée d'un sel dont ce métal forme la base, de sel marin (chlorure de sodium), je suppose. Aussitôt on voit apparaître une raie jaune d'une grande intensité et aux contours très-nets. C'est la raie unique du spectre du sodium [1].

Le lithium donne deux raies principales, l'une jaune d'un faible éclat, l'autre rouge et brillante; le potassium fournit deux raies caractéristiques, une rouge, une violette; d'autres raies jaunes et vertes les accompagnent. Le calcium donne une raie verte très-vive, une orangée, une bleue. Le strontium, huit raies, dont six sont rouges, une orangée, une bleue; le baryum, deux raies vertes; le thallium, une raie unique, de couleur verte et remarquable par son éclat.

Un grand nombre de corps simples ont été étudiés de cette manière, les raies brillantes de leurs spectres reconnues et fixées de position, de sorte qu'il suffit d'examiner et de comparer aux résultats dont nous parlons le spectre d'une flamme, pour qu'on puisse en déduire la nature des vapeurs métalliques qui s'y trouvent en dissolution. De là, on le comprend, une nouvelle méthode d'analyse pour la chimie, méthode si délicate et si sensible, que la millionième partie d'un milligramme de sodium suffit pour qu'on voie aussitôt apparaître la raie jaune caractéristique du spectre de ce métal.

Cinq nouveaux métaux ont été découverts par cette méthode : les deux premiers, le cæsium et le rubidium, par MM. Bunsen et Kirchhoff; le troisième, le thallium, par M. Crookes et M. Lamy; le quatrième, l'indium, par MM. Reich et Richter; le cinquième enfin, le gallium, par M. Lecoq de

1. Un plus grand pouvoir dispersif et une fente très-étroite montrent que cette raie, la raie D de Fraunhofer, est double : on désigne l'une par la lettre D_1, l'autre par D_2. Cette dernière est la plus réfrangible. Sept autres lignes ont été reconnues depuis dans le spectre du sodium.

Boisbaudran. Le nom du cæsium lui vient de deux raies bleues; celui du rubidium, des raies rouges qui caractérisent son spectre; le nom du thallium rappelle la raie verte caractéristique de ce métal, et celui de l'indium une raie bleue située dans l'indigo. Une pensée patriotique a fait donner au cinquième métal ainsi découvert (deux raies dans le violet) le nom de gallium, associant le nom de la France à cette nouvelle conquête de l'analyse spectrale.

Jusque-là le spectroscope, quelque admirables que soient les progrès qu'il avait fait faire à l'analyse chimique, ne sortait pas du domaine des laboratoires : il permettait d'analyser, de reconnaître des substances terrestres que nous pouvons voir ou toucher, indiquant même la présence de corps jusqu'alors inconnus. Mais ce n'est pas à cela que devait se borner sa puissance. Grâce à lui, on est allé plus loin; on a pu aborder et résoudre en partie un problème qui paraissait inaccessible aux investigations humaines : étudier la composition chimique des astres, celle du Soleil, celle des étoiles, de ces soleils si prodigieusement éloignés de nous, des nébuleuses que les télescopes nous montrent plongées dans les abîmes de l'éther, à de telles distances que l'imagination peut à peine en sonder la profondeur.

Voici, en quelques lignes, les expériences qui ont conduit à un si merveilleux résultat.

Plaçons la flamme d'un bec de gaz en avant de la lunette du spectroscope, et affaiblissons-la au point de n'avoir plus qu'une flamme bleuâtre, à peine sensible. En cet état, elle ne fournit pas de spectre; il y a obscurité complète derrière le prisme. Mais qu'on introduise un sel métallique dans la flamme, un peu de sel marin par exemple, aussitôt apparaît la raie jaune du sodium : c'est ce que nous venons de voir tout à l'heure. Si, en même temps, et dans le même prisme, on introduit un rayon du Soleil, de façon que le spectre du sodium et le spectre solaire se superposent, on remarquera,

comme le fit le premier Léon Foucault, une coïncidence parfaite dans la position de la raie jaune du sodium et de la double raie sombre D de Fraünhofer.

Maintenant, à la lumière du Soleil substituons la lumière intense connue sous le nom de lumière de Drummond, — on l'obtient en brûlant un fragment de chaux dans un bec de gaz mélangé d'oxygène ; — le spectre de cette lumière, vu isolément, offre un vif éclat et une continuité parfaite : il ne contient aucune des lignes sombres du spectre solaire. Mais si on fait en sorte qu'il recouvre exactement le spectre du sodium, en faisant passer la lumière Drummond au travers de la flamme sodée, aussitôt la ligne jaune du sodium disparaît et fait place à une ligne obscure, occupant précisément la même position que la raie brillante.

C'est ce phénomène que M. Kirchhoff a désigné sous le nom de *renversement du spectre des flammes*. Il a été constaté sur un assez grand nombre de spectres métalliques. « Si l'on fait arriver, dit-il, un rayon solaire au travers d'une flamme de lithium, on voit apparaître dans le spectre, à la place de la raie rouge, une raie obscure qui rivalise par sa netteté avec les raies de Fraünhofer les plus caractéristiques, et qui disparaît lorsqu'on enlève la flamme de lithium. Le renversement des raies brillantes des autres métaux s'obtient moins facilement ; cependant nous avons été assez heureux, M. Bunsen et moi, pour renverser les raies les plus brillantes du potassium, du strontium, du calcium et du baryum.... »

Maintenant, quelle conséquence tire-t-on de ce fait singulier? C'est que les vapeurs métalliques, douées de la propriété d'émettre en abondance certains rayons colorés de préférence aux autres, absorbent au contraire ces mêmes rayons émanés d'une source lumineuse et traversant la première source. Ainsi, la lumière du sodium, qui émet des rayons jaunes, absorbe précisément les rayons jaunes de la lumière Drummond, à leur passage dans la première, tandis qu'elle est parfaite-

Fig. 38. Une portion du spectre solaire, d'après Kirchhoff. Coïncidence des raies du fer, du nickel, du magnésium, etc.

ment transparente pour tous les autres rayons. De là, cette raie noire qui vient se placer, dans le spectre continu, à la place qu'occupait la raie brillante du sodium.

Si cette absorption est un fait général, il faut en conclure que les raies noires, observées dans le spectre solaire, indiquent le renversement d'autant de raies brillantes, qu'émettraient isolément les vapeurs métalliques de son atmosphère. Cette atmosphère joue, pour nous, le rôle du brûleur obscur de Bunsen, et la vive lumière du corps du Soleil, celui de la lumière Drummond, dans la même expérience.

En étudiant à ce point de vue les raies noires du spectre solaire, Bunsen et Kirchhoff ont pu constater la coïncidence

d'un grand nombre d'entre elles avec les raies brillantes de certains métaux. Par exemple, les soixante-dix lignes brillantes du fer, variées de couleur, de largeur et d'intensité, coïncidaient, sous tous ces points de vue et d'une façon si précise avec soixante-dix raies sombres du Soleil, qu'il fut impossible de douter qu'il y eût dans l'atmosphère solaire du fer à l'état de vapeur métallique. Les mêmes savants ont reconnu la présence de sept autres corps simples : l'hydrogène, le cuivre, le zinc, le chrôme, le nickel, le magnésium, le baryum, le calcium et le sodium. La figure 38 est la reproduction, d'après Kirchhoff, d'une portion du spectre solaire où se trouve marquée la coïncidence de plusieurs raies métalliques avec les raies sombres de ce spectre.

§ 2. ÉLÉMENTS CHIMIQUES DE LA PHOTOSPHÈRE.

Il résulte des principes de l'analyse spectrale, dont on vient de lire un résumé succinct, que le spectre solaire est un spectre d'absorption; en d'autres termes, qu'il est produit par une source de lumière qui, seule, donnerait un spectre continu, si ses radiations n'avaient à traverser un milieu beaucoup moins lumineux. Ce milieu absorbant, gazeux ou formé de vapeurs métalliques incandescentes, s'il pouvait être isolé et analysé par le prisme, donnerait au contraire un spectre discontinu, formé précisément d'autant de lignes brillantes qu'il y a de lignes sombres dans le spectre solaire lui-même.

Kirchhoff en concluait que le globe solaire, limité par l'enveloppe photosphérique, est une masse solide ou plutôt liquide à l'état d'incandescence. Les vapeurs qui s'élèvent de la surface forment autour d'elle une épaisse atmosphère absorbante, dont la composition chimique est précisément celle du globe du Soleil. Les opinions restent partagées en ce qui concerne l'état de fluidité de la photosphère, et la plupart des

astronomes penchent vers une opinion différente, celle qui consiste à regarder la photosphère et même le globe tout entier du Soleil comme une masse gazeuse qu'une température très-élevée maintient à l'état d'incandescence. Les particules lumineuses, qui donnent à la photosphère son éclat, seraient comme des nuages condensés, dont les particules solides ou liquides joueraient, quant à la lumière photosphérique, le rôle que les parcelles solides de charbon jouent dans la flamme brillante du gaz d'éclairage.

Ces particules solides ou liquides, ces nuages lumineux baignant dans leur propre vapeur seraient ainsi enveloppés d'une couche atmosphérique absorbante; si faible que soit l'épaisseur de cette couche, elle suffirait à expliquer le phénomène des raies noires du spectre solaire; et l'atmosphère étendue que supposait Kirchhoff est inutile dans cette hypothèse, aujourd'hui généralement adoptée. On verra plus loin quelles autres raisons s'opposent à la théorie proposée par le chimiste d'Heidelberg; mais ses travaux sur la constitution chimique du Soleil restent entiers. Depuis 1860, des recherches semblables ont même considérablement étendu les premiers résultats d'une méthode grâce à laquelle ont pu être abordées des questions jusqu'alors considérées comme insolubles.

Voici, dans l'état actuel des connaissances sur ce point, quelle est la composition chimique des vapeurs interposées au devant de la photosphère, et probablement aussi celle de la photosphère même :

CORPS SIMPLES DONT L'EXISTENCE DANS LE SOLEIL A ÉTÉ DÉMONTRÉE PAR L'IDENTIFICATION DES RAIES DE LEUR SPECTRE AVEC LES RAIES DU SPECTRE SOLAIRE[1].

Hydrogène	4	Aluminium	2	Nickel	33	Strontium
Sodium	9	Fer	450	Zinc	2	Cérium
Baryum	11	Manganèse	57	Cuivre	7	Uranium
Calcium	75	Chrome	18	Titane	118	Plomb
Magnésium	4	Cobalt		Cadmium		Potassium

1. Dans cette liste, le fer entre pour 450 raies (Kirchhoff n'en avait trouvé

Il est à remarquer que l'hydrogène est, jusqu'à présent, le seul métalloïde dont la présence soit accusée par des raies sombres dans le spectre solaire : ni l'azote, ni l'oxygène, ni le carbone ne paraissent exister dans le Soleil ; le soufre, le brôme, le chlore et l'iode sont dans le même cas. Il ne paraît y avoir non plus ni or, ni argent, ni mercure. Mais ces conclusions ne peuvent être considérées comme absolues ; d'abord, il est possible que les vapeurs de certains éléments soient trop lourdes pour émerger au-dessus de la photosphère ; et puis, il s'en faut que l'analyse spectrale ait dit son dernier mot. N'oublions pas que les termes de comparaison sont les raies brillantes des spectres métalliques ou autres, telles qu'elles apparaissent dans les conditions des expériences faites à la surface de la Terre. Or, selon plusieurs savants (Plücker, Angström, Frankland par exemple), les spectres des gaz, tout en conservant leurs raies caractéristiques, varient lorsque change la pression ou la température : le nombre des raies augmente, ainsi que leur intensité, quand ces deux éléments physiques subissent un accroissement.

Enfin, comme l'ont prouvé les recherches de Mitscherlich, quand plusieurs éléments chimiques sont en présence dans une flamme, il arrive quelquefois que des raies principales de leurs spectres disparaissent : ainsi, quand on imprègne de cuivre et d'ammonium la flamme du chlorure de strontium, la raie bleue de ce dernier métal disparaît.

Certains corps simples peuvent donc se trouver en réalité dans le Soleil, sans que leur présence soit accusée dans le spectre par le renversement de leurs raies.

Et d'autre part, en effet, l'étude directe des raies brillantes

que 70), le sodium pour 9 lignes et l'hydrogène pour 4; ce sont toutes les raies des spectres de ces corps; sur 27 et sur 14, le zinc et l'aluminium n'en ont chacun que 2 (encore sont-elles douteuses). Les métaux dont les noms ne sont pas suivis de chiffres ont été reconnus par Lockyer. Kirchhoff, Angström et Thalén ont donné les autres.

qu'on peut observer aujourd'hui dans l'atmosphère du Soleil, démontre l'existence de quelques-uns des corps simples, que la seule analyse des raies sombres avait fait croire absents. La nouvelle méthode n'en est pour ainsi dire qu'à son début, puisqu'elle ne date que de quelques années; elle est loin d'avoir produit tous ses fruits.

§ 3. RAIES TELLURIQUES DU SPECTRE SOLAIRE.

Pour que les conclusions des paragraphes précédents fussent à l'abri de toute objection, il fallait encore prouver que l'absorption qui produit les raies noires du spectre solaire, ne provient pas de l'interposition d'un milieu autre que l'atmosphère du Soleil.

Or, entre la photosphère et l'œil ou l'instrument d'analyse, le prisme, il y a un autre milieu absorbant, l'atmosphère terrestre. Ce milieu n'agit-il pas nécessairement sur les ondes photosphériques, pour éteindre celles qui correspondent aux radiations des éléments qui s'y trouvent réduits en vapeur?

C'est ce qui arrive en effet.

La première constatation de l'absorption atmosphérique remonte à l'année 1833. A cette époque, D. Brewster découvrit dans le spectre du Soleil des altérations qui indiquaient une action de notre atmosphère : au lever ou au coucher de l'astre, des bandes obscures venaient modifier certaines régions du spectre, mais ces bandes disparaissaient à mesure que le Soleil s'élevait à des hauteurs plus grandes au-dessus de l'horizon. Notre savant compatriote, M. Janssen, reprit trente ans plus tard l'étude de ces modifications. En employant de nouvelles dispositions optiques et des instruments plus puissants d'analyse, il parvint à résoudre en raies fines les bandes qu'avait observées Brewster; il prouva que si ces raies ont leur plus grande intensité au lever et au coucher du So-

leil, et diminuent à mesure que l'astre monte sur l'horizon, elles ne disparaissent point complétement, alors même qu'il est au méridien. L'absorption suit la loi de décroissement d'épaisseur qu'ont les couches atmosphériques traversées par les rayons solaires. M. Janssen fit au sommet du Faulhorn des expériences qui confirmèrent ces vues : à cette hauteur de trois mille mètres, il constata dans le spectre solaire une diminution générale de toutes les raies obscures dont l'origine terrestre était alors soupçonnée. Pour prouver que l'action dont il s'agit ne provenait point des milieux de nature inconnue que

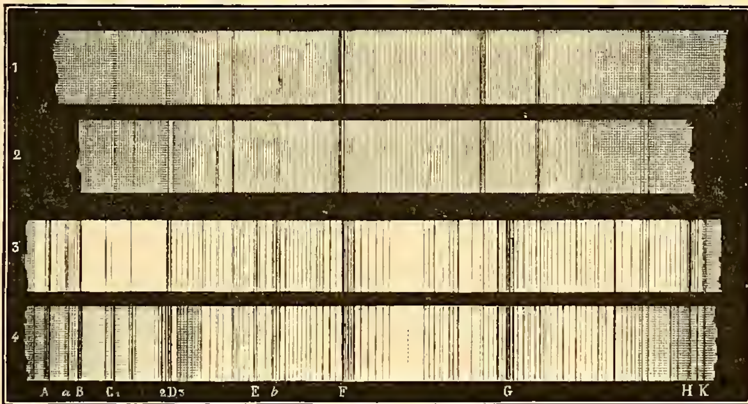


Fig. 39. Spectres du Soleil et de Sirius au méridien (3, 1) et à l'horizon (4, 2). Raies et bandes telluriques, d'après J. Janssen.

les ondes lumineuses avaient à franchir, en venant du Soleil ou de tout autre corps céleste jusqu'à la Terre, il fit une expérience décisive. Ayant fait allumer près de Genève un grand bûcher de sapin, il ne trouva qu'un spectre uniforme et continu dans la flamme observée à une faible distance ; la même flamme, analysée à vingt et un kilomètres du foyer, présenta dans son spectre les bandes d'absorption du spectre solaire vu à l'horizon.

Enfin d'autres expériences prouvèrent au savant astronome et physicien français, que la plupart des raies obscures ainsi observées étaient dues à l'action de la vapeur d'eau répandue

dans l'atmosphère de la Terre. Leur ensemble forme ce qu'il appelle le spectre de la vapeur d'eau. Quant à la totalité des lignes sombres que produit l'absorption atmosphérique, pour les distinguer des raies sombres d'origine solaire, M. Janssen leur a donné le nom de *raies telluriques*. Les figures 39 et 40 permettent de faire aisément cette distinction. La première donne l'ensemble des spectres de Sirius et du Soleil vus au

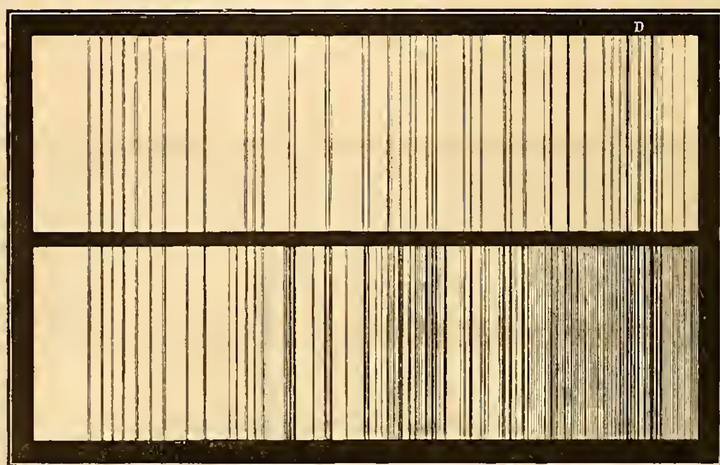


Fig. 40. Raies telluriques de la région D du spectre solaire, d'après J. Janssen.

méridien ou à l'horizon ; la seconde donne un fragment du spectre solaire voisin de la raie D.

Outre leur importance propre, les recherches que nous venons de résumer montrent donc que si l'atmosphère terrestre a une action absorbante élective sur la lumière du Soleil, cette action n'est pas la seule. Les raies telluriques exceptées, les autres raies sont évidemment des raies d'origine solaire, et les conclusions des recherches précédentes d'analyse spectrale demeurent entières. La chimie solaire reste par conséquent basée sur des principes incontestés.

§ 4. ÉLÉMENTS CHIMIQUES DES PROTUBÉRANCES ET DE LA CHROMOSPHÈRE.

L'analyse spectrale a fait faire un grand pas, on vient de le voir, à l'astronomie physique, en dévoilant la constitution intime du Soleil, tout au moins celle de son enveloppe lumineuse. Il restait à appliquer la même méthode à l'atmosphère du Soleil, à la couronne et aux protubérances. Or, on ne pouvait se livrer à ces recherches nouvelles que dans les rares occasions où ces phénomènes sont visibles, c'est-à-dire pendant les éclipses totales. Ce qu'avaient appris les éclipses antérieures permettait de concevoir dans cette direction l'espoir de nouvelles et importantes découvertes. On va voir que ces espérances ont été réalisées et au delà.

L'éclipse totale du 18 août 1868 fournit une occasion décisive. La durée, exceptionnellement grande, de la totalité de cette éclipse, atteignait presque le maximum. De $3^m 45^s$ à Aden, elle devait atteindre $5^m 36^s$ dans l'Hindoustan, et jusqu'à $6^m 45^s$ dans la presqu'île de Malacca. De nombreuses expéditions furent envoyées sur divers points du parcours de l'éclipse. Ne mentionnons que les résultats relatifs à l'analyse spectrale. Les voici en quelques lignes.

Un observateur anglais, le lieutenant Herschel, examinant au spectroscope une protubérance, vit trois lignes brillantes, une raie rouge, une raie orangée et une ligne bleue. A Guntoor, le major Tennant vit cinq lignes brillantes, voisines des raies C, D, E, F et G. M. Janssen, qui observait au même lieu, ayant disposé la fente du spectroscope adapté à sa lunette, tangentiellement au limbe de la Lune, vit, aussitôt que le dernier filet lumineux du Soleil eut disparu, « deux spectres formés de cinq ou six lignes très-brillantes, rouge, jaune, verte, bleue, violette ». Ces spectres, hauts d'une minute en-

viron, étaient dus à deux magnifiques protubérances situées à droite et à gauche de la ligne des contacts.

Enfin, M. Rayet, à Wha-Tonne (presqu'île de Malacca), fit l'observation suivante : « Dès l'instant de l'obscurité totale, la fente du spectroscope ayant été portée sur l'image de la longue protubérance qui se montrait alors sur le bord oriental du Soleil, je vis immédiatement une série de neuf lignes brillantes, très-brillantes même, se détachant sur un fond uniforme presque noir, ou plutôt d'un violet très-obscur ; aucune trace de spectre coloré donné par la couronne et pouvant servir de point de repère pour la mesure de la déviation des lignes

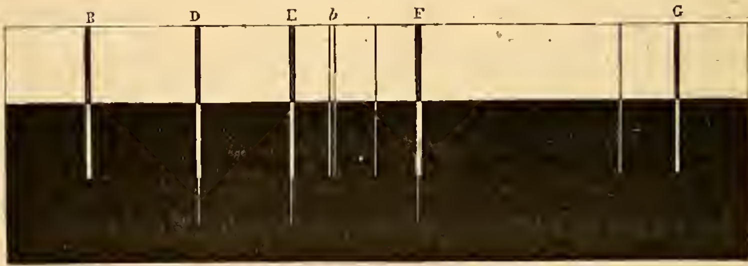


Fig. 41. Les neuf raies brillantes des protubérances, d'après l'observation faite le 18 août 1868 à Wha-Tonne, par M. G. Rayet.

brillantes. Néanmoins, par leur disposition dans le champ, par leur espacement relatif, par leur couleur, et enfin par la physionomie même de leur ensemble, ces lignes m'ont semblé pouvoir être assimilées aux principales raies du spectre solaire B, D, E, *b*, une ligne inconnue F, et deux lignes du groupe G. » Trois des lignes étaient plus longues que les autres ; et comme la fente du spectroscope coupait alors la protubérance dans le sens de sa hauteur, M. Rayet en conclut que la base de la protubérance donnait un spectre plus riche en raies brillantes que celui du sommet, lequel n'avait que les prolongements amincis des raies D, E, F.

Quelle conséquence dut-on tirer de ces intéressantes observations ? C'est que les protubérances sont des objets réels, des

masses gazeuses à l'état d'incandescence ; qu'elles ont généralement la même composition chimique; enfin, que dans cette composition entre l'hydrogène, puisque les raies C et F de leur spectre sont des raies caractéristiques du spectre de ce gaz.

L'éclipse totale d'août 1868 répondit ainsi aux espérances que les astronomes en avaient conçues. Mais elle donna beaucoup plus, comme on va voir.

M. Janssen, frappé du vif éclat des raies des protubérances, conçut aussitôt la pensée qu'il serait possible de les voir en dehors des éclipses. Dès le lendemain, 19 août, la méthode et les moyens d'exécution qu'il avait, pendant la nuit, médités dans son esprit, furent heureusement appliqués. « J'étais depuis peu de temps, dit-il, à étudier la région protubérantielle du bord occidental, quand j'aperçus tout à coup une petite raie rouge, brillante, de 1 à 2 minutes de hauteur, formant le prolongement rigoureux de la raie obscure C du spectre solaire. En faisant mouvoir la fente du spectroscope (placée en partie sur le disque solaire et en partie au dehors, de manière à donner deux spectres, celui du Soleil et celui de la région protubérantielle), de manière à balayer méthodiquement la région que j'explorais, cette ligne persistait, mais elle se modifiait dans sa longueur et dans l'éclat de ses diverses parties, accusant ainsi une grande variabilité dans la hauteur et dans le pouvoir lumineux des diverses régions de la protubérance. » Peu après, une autre raie, la ligne brillante F, fut également aperçue et en même temps que C. La coïncidence de ces deux lignes avec les raies obscures C et F du spectre solaire ne pouvait plus laisser de doutes sur la nature du gaz incandescent des matières circumsolaires. Ce gaz était bien l'hydrogène.

M. Janssen étudia ainsi, le premier, en dehors des éclipses, ces phénomènes qu'on ne croyait pas pouvoir observer dans les circonstances ordinaires. Il put même déterminer approxi-

mativement la forme et les dimensions des protubérances observées, et constater les changements rapides qui se produisent au sein de ces masses gazeuses.

Quel est le principe de la nouvelle méthode d'observation? Le voici réduit à ses termes les plus simples. Ce qui empêchait l'observation habituelle, au télescope, des accidents circumsolaires, c'est l'éclat incomparablement plus intense de la lumière photosphérique, comparé à celui de la lumière des protubérances. Or l'emploi du spectroscope fait en grande partie disparaître cette difficulté : le prisme étale, en effet, toute la lumière si vive du disque en un long ruban, dès lors beaucoup moins lumineux : au contraire, les protubérances ne fournissant qu'un petit nombre de raies, leur faible lumière se trouve tout entière concentrée sur deux ou trois points, deux ou trois régions étroites, dont l'éclat est alors comparable à celui des rayons solaires correspondants.

Toutefois, M. Janssen, au début, avait dû éteindre dans le spectre solaire, à l'aide de diaphragmes ou d'écrans, les régions les plus brillantes dans le jaune, le vert et le bleu.

Pendant que le savant français faisait dans l'Inde cette découverte mémorable, un astronome anglais, M. Lockyer, arrivait d'une façon indépendante au même résultat [1]. Il constatait trois raies brillantes (une C, exactement, une autre près de F, une troisième plus réfrangible que la raie D). Cette dernière ligne, qui est décidément différente de l'une des raies D du sodium, est remarquable surtout en ce qu'elle n'a de correspondance avec aucune des lignes obscures du spectre, ni avec aucune raie connue des spectres métalliques. Des

1. Dans la même séance de l'Académie des sciences (celle du 26 octobre 1868), où les observations du 19 août, de M. Janssen, étaient lues à Paris, M. Warren de la Rue communiquait deux lettres, où M. Balfour Steward et M. Lockyer annonçaient le succès de ce dernier. M. Lockyer avait conçu depuis deux ans la possibilité de voir les protubérances en dehors des éclipses, mais il n'avait pu réussir, quand la note de M. Rayet sur les raies observées par notre compatriote à Malacca le mit sur la voie.

savants anglais ont pensé qu'elle était l'indice d'une substance particulière au Soleil, qu'ils ont nommée pour cette raison *hélium*. Cela n'est qu'une conjecture; mais ce qui n'en est point une, c'est que, comme l'a fort bien établi notre savant compatriote, M. G. Rayet, « la ligne jaune (D_3) se voit sur tout le pourtour du disque solaire avec une facilité au moins aussi grande que les trois lignes de l'hydrogène ; le gaz incandescent auquel elle correspond est donc, au même titre que l'hydrogène, un des éléments constitutifs de l'atmosphère so-

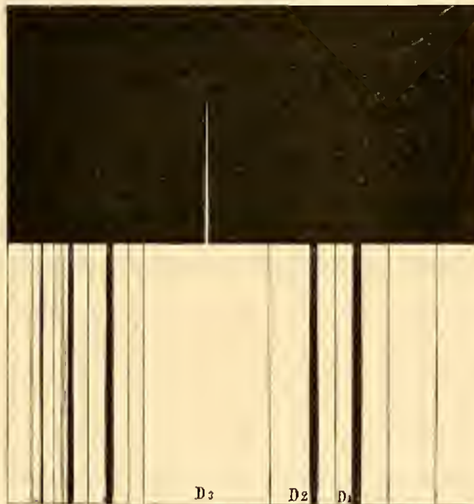


Fig. 42. La ligne brillante D_3 du spectre de la chromosphère.

laire. » Mais il serait trop long de suivre, historiquement, les progrès que la physique et la chimie solaires ont faits, depuis que la nouvelle méthode d'observation a été trouvée, puis successivement perfectionnée. En Angleterre, en Amérique, en France, en Italie, divers observateurs ont contribué à ces progrès : Lockyer, Janssen et Rayet, Respighi, Secchi, Tacchini, les professeurs et docteurs Gould, Young, etc., se sont particulièrement distingués dans cette nouvelle branche de la science.

Revenons maintenant aux faits, à la chimie solaire.

On reconnut bientôt (Lockyer et Janssen), non-seulement que les protubérances se voyaient sur tout le contour du disque solaire, mais qu'elles adhéraient la plupart, par leur base, à une couche continue d'une matière constituée chimiquement de la même manière que les protubérances, c'est-à-dire consistant en gaz hydrogène à l'état d'incandescence. Ce n'était autre chose que la couche rouge ou rose signalée précédemment par plusieurs observateurs des éclipses totales[1].

Cette couche ou atmosphère hydrogénée a reçu le nom de *chromosphère.*

L'observation spectroscopique de la chromosphère continuée avec persévérance depuis cette époque, a donné un nombre de plus en plus grand de lignes brillantes, et révélé ainsi l'existence, dans les couches les plus basses de cette enveloppe, de vapeurs métalliques de diverses natures, du magnésium notamment, dont Tacchini a signalé la présence sur le contour entier du Soleil. Le nombre des raies brillantes du spectre chromosphérique, qui était de vingt-deux en 1871 (tableau donné par M. Rayet), fut porté l'année suivante, par le professeur Young, à cent trois. Enfin, ce dernier observateur mettant à profit d'excellentes conditions d'observation, faites par un ciel très-pur, sur les hauteurs des Montagnes

1. Il faut noter ici que cette continuité de la couche rose avait été plus que soupçonnée dès 1860 par M. Le Verrier, qui observa sur une étendue d'environ 30 degrés un filet d'un rouge pourpre, qui grandissait peu à peu à mesure que le disque noir de la Lune démasquait le contour solaire, et dont le bord extérieur était irrégulier. « Faut-il croire, disait ce savant astronome en parlant de ces nuages rouges, que la surface entière de l'astre en est parsemée jusqu'à une faible hauteur comme elle est semée de facules, et que les nuages roses en sont des émanations comme les taches qui apparaissent sur le disque de l'astre? » M. Le Verrier ajoutait à la même époque : « Ce qui est établi, c'est que les protubérances roses isolées ne sont plus qu'un accident secondaire d'une couche atmosphérique qui entoure le noyau lumineux du Soleil. Cette atmosphère n'a pas partout la même épaisseur. La bande observée au moment de l'émersion était irrégulière et dentelée à sa partie supérieure. » Tout cela se trouve entièrement confirmé par les observations faites à l'aide des nouvelles méthodes.

Rocheuses, a donné récemment une liste beaucoup plus nombreuse encore des raies brillantes du spectre de la chromosphère. On y trouve deux cent soixante-treize raies, dont un grand nombre ont pu être identifiées à ceux des métaux ou métalloïdes suivants :

Hydrogène	Cobalt
Sodium	Chrome
Baryum	Lithium
Magnésium	Calcium
Fer	Soufre
Manganèse	Cérium
Nickel	Strontium
Titane	

D'autres éléments paraissent exister aussi dans la chromosphère, mais le degré de probabilité est moindre ; ce sont les suivants : zinc, erbium, yttrium, lanthane, didyme. Enfin, Young signale la coïncidence de quelques raies appartenant aux spectres de l'oxygène, de l'azote et du brome, de l'iridium ou du ruthénium.

Si ces dernières probabilités se confirment, on voit que les éléments chimiques, dont l'existence dans le Soleil avait été constatée par l'étude spectroscopique de la photosphère, seraient augmentés de tous ceux que l'atmosphère solaire renferme. La lacune singulière qui semblait résulter de l'absence des gaz permanents ou des métalloïdes, tels que l'oxygène, l'azote, le soufre, le brome, serait ainsi comblée.

§ 5. SPECTRE DE LA COURONNE.

Si l'on réserve le nom de chromosphère à la couche continue d'hydrogène incandescent qui enveloppe la photosphère du Soleil, en y comprenant bien entendu les expansions de cette couche qui forment les protubérances, il reste au delà toute la partie lumineuse dont la couronne des éclipses totales

a révélé l'existence. Jusqu'en 1871, l'analyse spectrale n'avait point été appliquée à cette région circumsolaire, et l'on ne savait rien de sa véritable constitution.

L'éclipse du 12 décembre de cette année 1871 fournit une occasion d'explorer particulièrement la couronne extérieure, de vérifier si son spectre était continu, ainsi qu'on l'avait



Fig. 43. Éclipse du 12 décembre 1871, observée à Shoolor (Hindoustan), par M. J. Janssen.

trouvé précédemment, ou s'il renfermait en outre quelques lignes brillantes, les prolongements des raies des protubéranees de M. Rayet, ou la raie verte des observateurs américains de l'éclipse de 1869.

C'est M. Janssen qui répondit à ces diverses questions par les observations de Shoolor (Hindoustan). Muni d'un appareil spécialement disposé pour l'étude d'une aussi faible source

de lumière, M. Janssen reconnut nettement que le spectre de la couronne n'est point continu, qu'il contient les raies brillantes de l'hydrogène (en certains points jusqu'à 12′ ou 15′ de hauteur, et, en outre, la raie verte 1474 de l'échelle de Kirchhoff. Pour comparer directement les protubérances et la couronne, il plaça la fente du spectroscope normalement au limbe, de manière à couper une portion de la Lune, une protubérance et toute la hauteur de la couronne.

« Le spectre de la Lune, dit-il, est excessivement pâle ; il

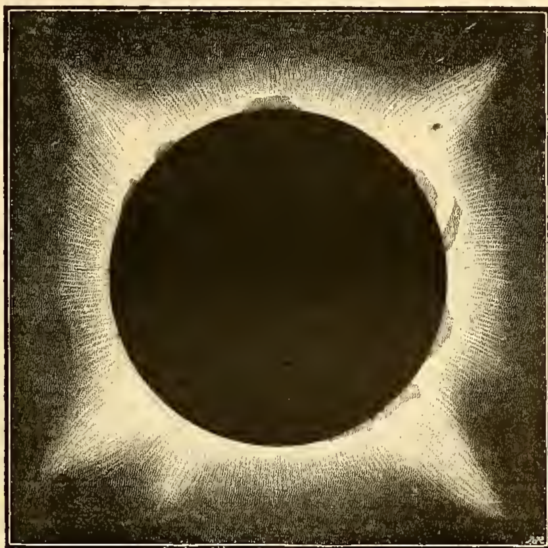


Fig. 44. Auréole de l'éclipse du 7 septembre 1869, d'après un dessin de M. Eastman.

paraît dû principalement à l'illumination atmosphérique, et donne une mesure précise de la faible part que notre atmosphère peut prendre dans le phénomène de la couronne. La protubérance donne un spectre très-riche et d'une grande intensité; je n'ai point le temps d'en faire une étude détaillée. Le point capital ici est de constater que les principales raies de la protubérance se prolongent dans toute la hauteur de la couronne, ce qui démontre péremptoirement l'existence de l'hydrogène dans celle-ci. La raie verte 1474, si vive dans le

spectre de la couronne, paraît s'interrompre dans le spectre de la protubérance. »

Mais outre des raies brillantes, le spectre coronal a présenté au savant observateur quelques lignes obscures, notamment la raie D, et quelques lignes dans le vert. Il en résulterait donc que la couronne ne brille pas seulement de sa lumière propre, mais qu'elle réfléchit encore la lumière que lui envoient la photosphère et les régions les plus brillantes de la chromosphère. Cette conséquence est corroborée par



Fig. 45. Fac-simile d'une photographie de la couronne pendant l'éclipse du 7 septembre 1869.

les observations faites au polariscope : d'après ces observations, la lumière de la couronne est partiellement polarisée (le maximum d'effet a lieu à quelques minutes du bord, ce qui laissait de l'incertitude sur la cause du phénomène) dans un plan qui passe par le centre du Soleil, de sorte qu'il y a là un autre témoignage qu'elle est en partie de la lumière solaire réfléchie[1]. La raie brillante 1474 caractérise particuliè-

1. Les observations polariscopiques faites pendant les éclipses totales antérieures depuis 1842 avaient donné des résultats contradictoires. Des traces

rement le spectre de la couronne. C'est la raie verte, observée dans l'éclipse de septembre 1869 par les astronomes américains, qui l'ont assimilée à la raie du spectre de nos aurores boréales [1].

Quelle substance cette raie indique-t-elle spécialement? On ne le sait encore. On a cru d'abord que c'était une des raies de la vapeur du fer. Mais le contraire paraît aujourd'hui reconnu (Young, Lockyer). Secchi a cru y voir une des raies de l'hydrogène, et enfin Watts, une ligne du spectre de l'oxygène. La question reste encore douteuse.

En résumé, il semble établi d'une manière certaine, que la couronne est un milieu très-rare, mais ayant une existence réelle; que sa lumière, due principalement à l'incandescence de l'hydrogène et d'une autre substance inconnue, est aussi en partie de la lumière solaire réfléchie. Sa hauteur n'est pas moindre de 12′, d'après les observations spectroscopiques de Janssen. Les photographies de l'éclipse du 7 septembre 1869 dues au professeur Meyer ne donnaient, il est vrai, que 2′ 16″ pour la hauteur de cette atmosphère. Mais, comme M. Gould l'a fait remarquer, « avec une durée d'exposition plus grande on a obtenu ailleurs des traces de cette atmosphère s'étendant jusqu'à 7′. » Ce dernier astronome est d'avis qu'il ne faut pas confondre ces impressions avec celles de l'auréole brillante visible à l'œil nu. Et, de fait, il y a une différence considé-

de polarisation furent trouvées en 1842, par d'Abbadie, Arago et Mauvais; par Liais en 1858; par Blaserna, Ranyard, Brett, Pickering et Langley en 1870; par Secchi et Prazmowski en 1860. Lockyer, en 1871, vit des franges de diffraction jusque sur le disque de la Lune, ce qui laissait de l'incertitude sur la cause du phénomène. Mais les résultats trouvés par M. Janssen en 1871 accusent nettement, comme ceux de Prazmowski, une polarisation radiale partielle.

1. A la question « qu'est-ce que la couronne? » les observateurs américains, dit Lockyer (*Contributions to solar physics*), ont répondu d'une façon bizarre et embarrassante au plus haut degré. La couronne, selon eux, n'est ni plus ni moins qu'une aurore solaire permanente; ils se fondent sur ce fait qu'une ligne de son spectre est celle des aurores boréales.

rable entre l'aspect de l'auréole de l'éclipse en question, telle qu'elle a été dessinée par l'observateur M. Eastman, et celle donnée par une épreuve photographique. C'est ce qu'on peut aisément vérifier en comparant les deux figures 44 et 45.

§ 6. ANALYSE SPECTRALE DES TACHES SOLAIRES.

Revenons maintenant à la photosphère, et voyons si le spectroscope donne quelques indications relatives à la nature des taches.

Si l'on place la fente du spectroscope sur une tache, de

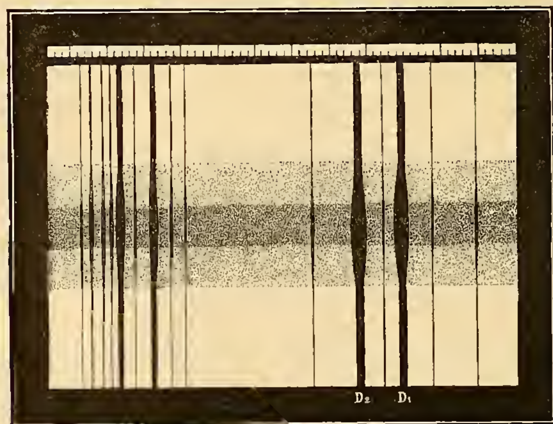


Fig. 46. Spectre du Soleil au travers d'une tache. Photosphère, pénombre et noyau.

manière qu'elle coupe à la fois le noyau, la pénombre et, de chaque côté, la photosphère, on obtient des spectres superposés de ces diverses régions de l'astre, sous l'apparence qu'on leur voit dans la figure 46. La plupart des lignes sombres du spectre solaire s'élargissent en traversant la pénombre et deviennent à la fois plus sombres, moins nettes ou plus nébuleuses; dans le noyau, elles s'élargissent encore. Du reste, une remarque importante à faire est celle-ci : les raies ne sont pas toutes également altérées; d'après Secchi, celles du

calcium sont plus élargies que celles du fer; dans les raies du chrome, du cobalt, du nickel, l'effet est presque insensible; les raies du sodium, fort élargies, deviennent nébuleuses.

Quelle est la cause de cet accroissement de largeur des raies d'absorption du spectre? Est-ce la simple diminution de lumière des pénombres et des noyaux? Non, puisque toutes les raies n'en sont pas affectées, et que celles qui le sont, le sont inégalement, et aussi puisque les espaces brillants compris entre les raies devraient alors être aussi affaiblis, ce qui n'est pas.

Secchi trouve que le spectre des taches est analogue à celui des bords du disque. Les taches étant considérées comme des cavités, l'épaisseur des couches absorbantes qui sur le disque produisent les raies obscures étant plus considérable dans les taches, l'absorption est plus complète; il en est de même des régions du bord, où les rayons de la photosphère ont à traverser une plus grande épaisseur de l'atmosphère solaire que vers les régions centrales.

D'après Lockyer, sur le bord du Soleil, dans la chromosphère, les raies brillantes sont plus minces que les lignes de Fraünhofer, comme dans les taches les raies obscures des mêmes substances sont au contraire plus larges[1]. Il en conclut que deux causes concourent à rendre les taches, noyaux et pénombres, plus sombres, moins lumineuses que le reste de la photosphère : c'est en premier lieu l'absorption générale de l'atmosphère solaire, plus épaisse à l'endroit des taches qu'ailleurs, si les taches sont des cavités; c'est aussi une absorption sélective qui éteint les rayons de certaines substances, sodium, baryum, magnésium, fer, le niveau où ces vapeurs se

1. Suivant ce savant, l'épaisseur d'une ligne spectrale est un indice de la pression du gaz ou de la vapeur qui la rayonne ou l'absorbe. Cette pression varie avec le temps à la surface du Soleil, et semble en rapport avec les époques des maxima et des minima des taches.

trouvent dans les taches étant plus bas que le niveau où elles sont généralement dans la photosphère.

Dans les facules ou taches brillantes, le spectre de la photosphère n'est pas modifié, il est seulement plus brillant.

Un phénomène assez rare, mais fort intéressant, est celui du renversement de certaines raies dans les noyaux des taches. La raie C et d'autres raies de l'hydrogène ont été vues brillantes par Secchi dans le spectre d'une tache, mais sur un pont lumineux qui traversait le noyau. Dans une tache à deux noyaux séparés par un pont, Rayet a vu la ligne C renversée dans la portion du spectre correspondant à l'un des noyaux; sur l'autre noyau, elle restait noire et disparaissait sans se renverser dans l'intervalle. Outre la raie C, Lockyer a vu la raie F devenir brillante en traversant de petites taches ou près de leurs bords. D'autres fois, elle se divisait en deux lignes, l'une sombre, l'autre brillante.

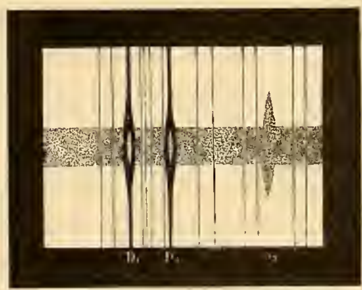


Fig. 47. Renversement des raies du sodium dans le noyau d'une tache, d'après le professeur Young.

Enfin, le professeur Young observant une grande tache voisine du limbe solaire, a vu, outre les raies brillantes C et F, les deux raies du sodium D_1 et D_2 renversées dans la portion du spectre qui correspondait au noyau (fig. 47). Dans le noyau de la tache, la ligne inconnue D_3 n'était pas visible, mais elle se voyait nettement dans la pénombre, sous forme d'une pointe obscure comme la figure la représente.

Quelle interprétation donner à ces faits? Celle qui nous semble le plus vraisemblable est, comme on l'a vu plus haut, que les taches sont des régions où l'épaisseur des couches absorbantes est la plus considérable, où la pression est par conséquent la plus forte : ainsi s'explique l'élargissement des raies

obscures. De plus, la diminution qui en résulte pour la radiation de la photosphère en ces points est telle, qu'il est possible de voir les lignes lumineuses de l'hydrogène et du sodium incandescents, produites par la radiation des portions de la chromosphère ou des protubérances qui surplombent le noyau, c'est-à-dire qui dominent la partie la plus profonde d'une tache.

Maintenant que nous avons décrit les phénomènes révélés par l'analyse spectroscopique des diverses régions du Soleil, phénomènes inconnus ou à peine soupçonnés avant l'invention de ces méthodes d'investigation, nous laissons la chimie solaire au point où l'ont amenée les recherches des quinze dernières années, et nous revenons à la chromosphère, à l'atmosphère qui l'enveloppe et aux protubérances qui, on le sait aujourd'hui, y naissent, s'y développent et s'y transforment constamment.

VII

LA CHROMOSPHÈRE.

§ 1. ASPECT ET DIMENSIONS DE LA CHROMOSPHÈRE.

La chromosphère est la portion de l'atmosphère solaire qui enveloppe immédiatement la surface photosphérique : c'est la zone la plus brillante qui, dans les éclipses totales, entoure le limbe obscur de la Lune, et dont les couches les plus basses ont, en plusieurs circonstances, apparu, comme formées de la matière rouge ou rosacée des protubérances.

C'est, en définitive, la région d'où émanent les protubérances elles-mêmes.

La composition générale de la chromosphère est celle de l'hydrogène incandescent. Mais dans ses couches inférieures, elle est fréquemment injectée de vapeurs métalliques, où le sodium, le magnésium et le fer paraissent dominer. Ces métaux atteignent parfois des hauteurs assez considérables, puisque le spectroscope en retrouve la trace jusque dans les sommets des protubérances. Lorsque Lockyer nomma la chromosphère[1], il n'entendait parler que de cette mince couche continue d'hydrogène au-dessus de laquelle s'élevait la ma-

1. Le nom de chromosphère est dû à la teinte colorée de l'atmosphère en question, ou à la nature de son spectre, uniquement composé de lignes brillantes colorées.

tière protubérantielle : aussi ne lui assignait-il que la hauteur de 5000 milles (8000 kilomètres, c'est-à-dire 10″ à 11″).

D'après Respighi, la hauteur de la chromosphère est variable (Lockyer l'a aussi trouvée moins grande en 1868 qu'en 1870); mais généralement elle n'excède pas 12″. Sans être absolument uniforme à toutes les latitudes, il n'y a pas cependant, selon Lockyer, de différence dans le niveau général, entre les régions équatoriales et les régions polaires. Au delà est la couronne, milieu gazeux d'une extrême ténuité dont nous avons vu que les dimensions, comme l'aspect, sont très-variables, et qu'il n'est guère possible d'assimiler à une atmosphère formée de couches de niveau ou d'équilibre.

La chromosphère elle-même est loin d'être constituée par de telles couches, ou du moins le niveau n'en est pas uniforme, mais au contraire fort inégal et tourmenté, même dans les points où la matière chromosphérique ne s'élève pas sous la forme de protubérances. On avait pu, déjà, dans les éclipses totales, constater l'apparence dentelée de la couche rose continue; mais, grâce à la méthode nouvelle d'observation, on a pu en étudier à loisir toutes les variations d'aspect[1].

D'après Secchi, la chromosphère se montre sous quatre apparences distinctes : la première est celle d'une couche terminée nettement, bien que l'éclat de sa lumière diminue un peu sur le bord; elle ressemble alors à la surface libre d'un liquide. Plus ordinairement, elle est sur toute sa longueur

1. MM. Zœllner et Respighi ont les premiers modifié la méthode découverte simultanément par MM. Janssen et Lockyer, de manière à pouvoir aisément explorer chaque jour la circonférence entière du disque du Soleil. A l'aide d'instruments spécialement disposés pour cette étude, dont la fente est placée tangentiellement au limbe solaire, les images de la chromosphère et des protubérances se voient entièrement avec tous leurs détails dans la fente convenablement élargie. Les images sont rouges, jaunes, vertes, bleues, selon la position de la raie de l'hydrogène qui fournit la lumière de l'image. C'est dans le rouge qu'elles se voient ordinairement le mieux : voilà pourquoi les dessins de ce genre sont généralement reproduits de cette couleur.

sillonnée de filaments, de traits de feu ou de langues de flammes dont la direction est tantôt normale, tantôt inclinée dans un sens ou dans l'autre : c'est le second et le plus général de ses aspects. Le troisième, qu'on observe surtout, paraît-il, dans le voisinage des facules, donne à la chromosphère un bord diffus mal limité. Le quatrième aspect, qui ne nous semble pas différer essentiellement du second, consiste en une série de flammes de forme conique, de protubérances rudimentaires, dirigées dans tous les sens.

§ 2. LES PROTUBÉRANCES. FORMES, DIMENSIONS ET TRANSFORMATIONS.

En jetant les yeux sur les nombreux dessins que l'on possède aujourd'hui de la chromosphère et de ses appendices d'hydrogène incandescents, il semble au premier abord difficile de les classer selon leurs formes apparentes. Ces formes, en effet, offrent la plus étonnante diversité.

Toutefois, ainsi qu'on l'avait remarqué pendant les éclipses totales, il y a entre les protubérances une première différence d'aspect assez caractéristique. Les unes, quels que soient d'ailleurs leurs contours, sont adhérentes au Soleil, à la chromosphère, sur laquelle elles reposent comme une montagne, des arbres, des rochers reposent sur le sol qui leur sert de support. D'autres protubérances, au contraire, sont séparées de la chromosphère ; elles sont suspendues comme des nuages dans l'atmosphère où elles paraissent flotter en vertu de leur légèreté spécifique, si ce n'est pas seulement une vitesse acquise dans un mouvement ascensionnel qui les maintient ainsi dans l'espace circumsolaire.

Dans les planches VIII et IX et dans les figures que nous donnons des protubérances, on peut déjà distinguer aisément ces deux dispositions.

Mais, parmi les protubérances qui reposent par leur base



Pralon Lith Imp Fraillery.

PROTUBÉRANCES SOLAIRES

Observées à Palerme, par P. Tacchini.

1. Protubérance mixte, filamenteuse et nébuleuse, 22 décembre 1871.
2. Pluie solaire, 3 septembre 1871. — 3. 7 juillet 1872.

sur la couche chromosphérique, il y a des formes extrêmement variées. Les unes semblent n'être que des soulèvements de la masse générale, comme si la mer incandescente, agitée par les vents, était devenue houleuse. Les autres ne semblent que des exagérations des flammes formant le niveau chromosphérique; elles s'élèvent au-dessus de ce niveau sous forme de langues coniques, tantôt droites, tantôt ondulées comme les flammes de nos foyers. D'autres encore semblent une agglomération de flammes semblables qui, réunies par la base, montent ensemble et s'amincissent par le sommet : le tout ressemble à une montagne conique.

Mais si au lieu de converger vers le haut, ces flammes divergent à partir de la base, on les verra former par leur réunion des gerbes, retombant à droite et à gauche comme les jaillissements d'un jet d'eau (fig. 48). Parfois, les rayons qui divergent ainsi sont rectilignes et sont de forme aiguë, comme de longues aiguilles ou des épées.

Souvent aussi, les protubérances ressemblent à de hautes colonnes verticales, surmontées de panaches ou de masses arrondies, comme le feuillage d'un arbre, ou coudées à angle droit comme si un vent violent chassait la fumée du sommet d'une cheminée d'usine.

Parfois enfin, des masses diffuses, des flammes diversement inclinées se pénètrent, s'enchevêtrent les unes dans les autres, et forment un ensemble bizarre, où l'on croit voir les arches d'un pont, les arceaux entrelacés d'une nef, les voûtes inextricables d'une forêt.

Quant aux nuages, ou protubérances séparées de la couche chromosphérique, ils affectent aussi toutes sortes de formes curieuses, difficiles à définir, ainsi qu'on en peut voir divers exemples dans les dessins que nous reproduisons fidèlement d'après les observateurs. Quelquefois ces nuages sont arrondis comme nos cumulus, ou déchiquetés, comme nos cirrus, ou n'offrent d'autre aspect que celui de flammes dé-

crites plus haut, qui auraient été entraînées, par un mouvement ascensionnel, au-dessus de la couche incandescente où elles auraient pris naissance. Enfin, on aperçoit souvent des filets lumineux déliés, isolés dans la région des protubérances, les uns inclinés, les autres verticaux, donnant les uns ou



Fig. 48. Protubérances en forme de jets ou de gerbes jaillissantes, d'après les observations faites à Harvard Collége (États-Unis).

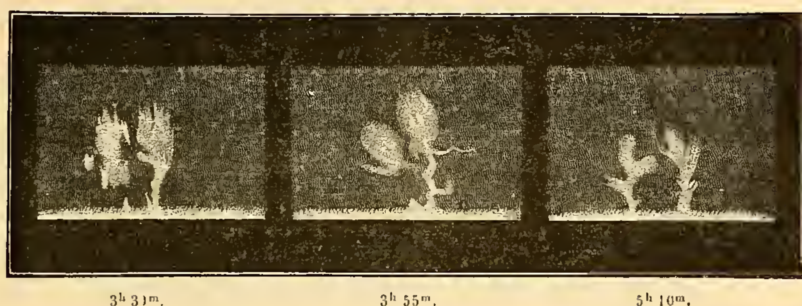
les autres l'idée d'une pluie de feu au sein de l'atmosphère solaire.

Une classification rigoureuse des formes variées que nous venons de passer en revue, n'aurait un intérêt sérieux que si elle correspondait à des différences physiques ou chimiques, ou à des modes distincts de formation. Nous verrons plus loin les tentatives qui ont été faites dans ce sens.

Un mot maintenant sur les dimensions de ces masses incandescentes qui, rappelons-nous-le, sont composées princi-

palement d'hydrogène incandescent, mais dont les couches les plus basses sont souvent injectées de vapeurs métalliques, fer, magnésium, sodium, etc.

Ces dimensions sont, en réalité, considérables. Nous avons déjà vu que l'épaisseur de la chromosphère ou de la couche rose continue varie entre 10″ et 12″, c'est-à-dire entre 7000 et 9000 kilomètres environ. Dès la fin de 1868, Lockyer mesurait des protubérances dont les dimensions variaient entre 35 000 et 200 000 milles (56 350 et 322 000 kilomètres), ou de 1′ à 7′ de hauteur verticale[1]. Quant à l'étendue superficielle, sur laquelle peut s'étendre une même protubérance, ou un



$3^h\,31^m$. $3^h\,55^m$. $5^h\,10^m$.

Fig. 49. Transformation d'une protubérance, d'après les observations faites à Genève, le 15 avril 1872, par M. E. Gautier.

groupe de ces accidents solaires, elle est en proportion avec la hauteur, embrassant souvent plusieurs degrés du limbe so-

1. Respighi fait remarquer qu'on ne mesure généralement pas la vraie hauteur des protubérances, puisque le disque solaire masque ordinairement leurs bases. Toutefois, de nombreuses observations lui ont permis de conclure que leurs plus grandes dimensions sont d'environ 6′. Il en a mesuré une sensiblement plus haute. Sur un nombre total de 7449 protubérances, il en a pu compter 1363 dont la hauteur atteignait ou dépassait 1′. Voici comment se décompose ce dernier nombre :

Protubérances	de 1′ à 2′	1154	de 4′ à 5′	3
	2′ à 3′	174	5′ à 6′	5
	3′ à 4′	27		

Ainsi les protubérances dépassant 4′ (175 000 kilom.) sont des cas extraordinaires ou exceptionnels.

laire (1 degré du contour du disque vaut environ 12 300 kilomètres).

Nous nous faisons difficilement une idée de phénomènes qui se montrent sous une échelle aussi gigantesque. Plongé dans la chromosphère, le globe terrestre serait presque totalement immergé dans un océan de feu dont les vagues étincelantes ou les flammes peuvent s'élever à des hauteurs de 80 000 lieues!

Ces dimensions paraissent d'autant plus étonnantes, que la

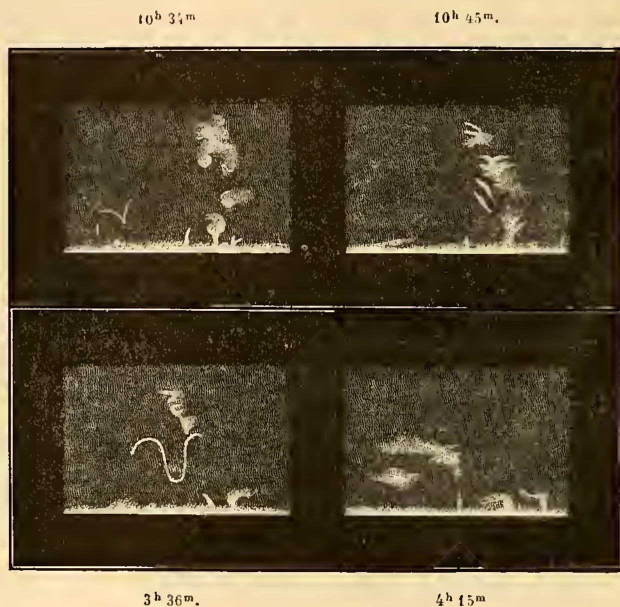


Fig. 50. Transformation d'une protubérance, observée à Genève, le 11 avril 1872, par M. E. Gautier.

rapidité avec laquelle se forment, se développent, se modifient les protubérances, est elle-même plus grande. Quelques heures suffisent pour les transformations les plus grandioses. Les figures 49 et 50 en donnent des exemples frappants, que les nombreuses observations recueillies permettraient d'ailleurs de multiplier.

Lockyer cite une protubérance de 64 000 kilomètres de hauteur, qui, dans un intervalle d'environ dix minutes, s'est réduite en morceaux. Le professeur américain Young a vu

(septembre 1870) un fragment se détacher d'une protubérance, puis s'élever obliquement en douze minutes et demie à une distance de 90 000 milles (155 000 kilomètres) : la vitesse de l'ascension n'était donc pas moindre de 120 milles ou près de 200 kilomètres par seconde.

Un mouvement et une transformation plus rapides encore avaient été constatés par le même observateur en septembre 1871. Le phénomène en question fut, selon ses propres expressions, une manifestation de l'activité, de l'énergie solaire, si remarquable par sa soudaineté et sa violence, qu'il mérite d'être décrit dans les termes et avec les détails donnés par le témoin lui-même :

« Le 7 septembre, à midi précis, celui qui écrit (Young, *Boston Journal of Chemistry*) avait étudié au télespectroscope une énorme protubérance, ou nuage d'hydrogène sur le bord oriental du Soleil. Elle était restée depuis le midi précédent sans changement appréciable, longue, basse, calme, ni très-dense ni brillante (fig. 51, 1), n'ayant rien de remarquable, si ce n'est son diamètre. Elle était composée en grande partie de filaments à peu près horizontaux et flottant au-dessus de la chromosphère; sa surface inférieure avait une hauteur de 15 000 milles, mais elle était reliée, comme c'est le cas ordinaire, à la surface chromosphérique par trois ou quatre colonnes verticales, plus brillantes et plus vives que les autres parties. Lockyer compare de telles masses aux figuiers du Bengale. En longueur, elle mesurait 3′ 45″, et en élévation 2′, à sa surface supérieure; c'est-à-dire 100 000 milles de long sur 54 000 milles de hauteur (161 000 kilomètres sur 87 000 kilomètres).

« A midi 30 minutes, heure où je fus appelé au dehors pour quelques minutes, rien ne faisait présager ce qui allait arriver, si ce n'est que le pilier soutenant l'extrémité méridionale était devenu extrêmement brillant et singulièrement courbé d'un côté, et que près de la base du pilier nord s'était déve-

loppé spontanément un petit amas brillant, ayant la forme d'une nuée orageuse.

« Quelle ne fut point ma surprise quand, revenu moins d'une demi-heure après (à $12^h\ 55^m$), je vis que dans ce temps l'objet tout entier avait été littéralement réduit en morceaux par quelque incroyable explosion de bas en haut. A la place du nuage en repos que je venais de quitter, *l'air* (si

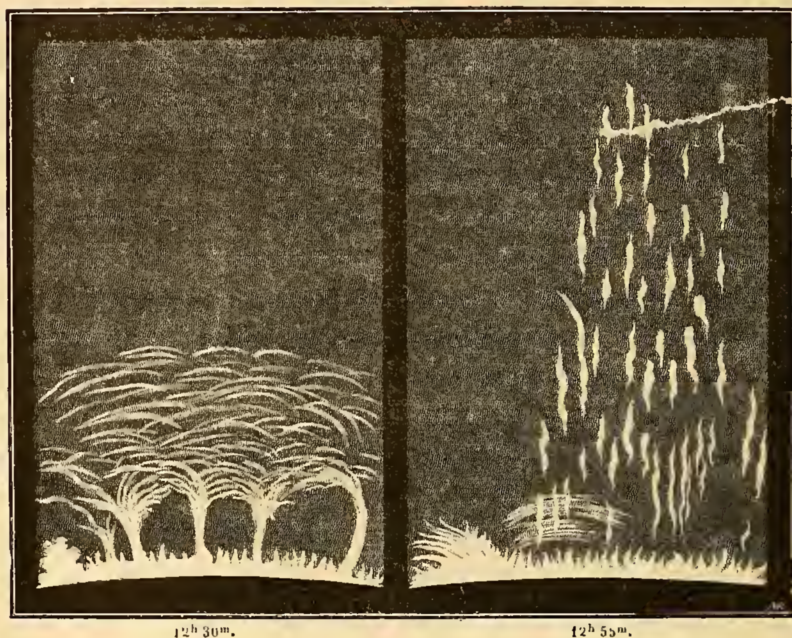


Fig. 51. Explosion d'une protubérance nuageuse à la surface du Soleil, d'après l'observation du professeur Young.

je puis employer cette expression) était parsemé de *débris* flottants, de filaments en forme de fuseaux verticaux (de 10″ à 30″ de longueur sur 2″ ou 3″ de largeur), plus brillants et plus serrés là où se trouvaient les piliers, et s'élevant rapidement.

« Quand je les aperçus en premier lieu, quelques-uns de ces filaments avaient atteint déjà une hauteur d'à peu près 4′ (161 000 kilomètres) ; je pus ensuite suivre des yeux leur

mouvement ascensionnel, qui, en dix minutes, les porta à 200 000 milles au-dessus de la surface solaire. Ces nombres furent obtenus par une mesure soigneuse; la moyenne de trois déterminations concordantes donne 7′ 49″ pour l'extrême altitude atteinte. J'insiste particulièrement sur cette mesure, parce que, à ma connaissance, la matière chromosphérique (l'hydrogène rouge en ce cas) n'avait point été observée jusqu'ici à une hauteur dépassant 5′. La vitesse d'ascension de 166 milles (260 kilomètres) par seconde, est la plus considérable de toutes celles constatées jusqu'ici. La figure 51 donne

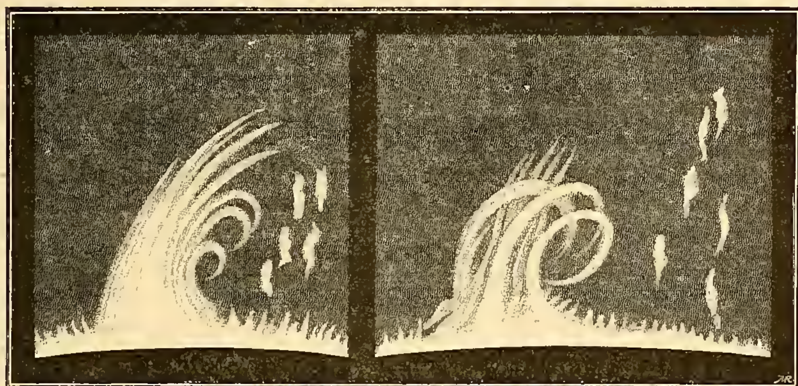


Fig. 52. Singulière transformation d'un nuage protubérantiel, d'après Young.

une idée générale du phénomène au moment où il atteignit son élévation maximum.

« A mesure que les filaments s'élevaient, ils s'effaçaient graduellement comme une nuée qui se dissout; à 1^{h} 15^{m}, quelques parcelles nébuleuses, et plus bas, près de la chromosphère, quelques bandes plus brillantes restaient seules à la place du phénomène. Mais, dans cet intervalle, le petit nuage orageux avait grandi, s'était développé d'une façon surprenante en un amas de flammes roulant en changeant incessamment de forme, pour parler selon les apparences. D'abord, ces flammes étaient comme refoulées en bas, le long de la sur-

face solaire; puis elles s'élevèrent comme une pyramide de 50 000 milles de hauteur, dont le sommet s'étira en longs filaments fort curieusement enroulés en arrière et de haut en bas, comme les volutes d'un chapiteau ionien; à la fin elles s'affaiblirent, et à $2^h 30^m$ elles s'évanouirent comme tout le reste. La figure 52 montre ces flammes dans leur plein développement, à $1^h 40^m$, puis à $1^h 55^m$. »

§ 3. PLUIES SOLAIRES. — FLAMMES. — PROTUBÉRANCES MIXTES.

Nous venons d'être témoins de phénomènes éruptifs, ou plutôt explosifs de la chromosphère. Il en est d'autres, tout aussi rares d'ailleurs, qui semblent présenter un caractère opposé; nous voulons parler de ce qu'un savant astronome italien, P. Tacchini, nomme *pluies solaires*.

Qu'on jette un coup d'œil sur la figure 3 de la planche IX. Sur une région du bord solaire embrassant 30° environ à l'ouest du limbe, se voit une protubérance nébuleuse formant une série d'arcs terminés en haut d'une manière diffuse. Le spectre est le spectre ordinaire des protubérances; à peine en quelques points quelques indices de la présence du magnésium. Tel était l'aspect offert par cette région dans la matinée du 7 juillet 1872. «Rien, dit M. Tacchini, ne pouvait faire soupçonner ce qui se présenta dans la soirée du 7 (à l'observatoire de Rome), et ce qu'on put observer le lendemain à Palerme.» Qu'on en juge en examinant la planche VIII qui donne l'aspect de la même région du bord solaire, dans la matinée du 8 juillet. Le bord de la chromosphère est alors formé de pointes ou flammes vives, en certains points de soulèvements nébuleux brillants; à l'extrémité nord, un amas de fils d'une extrême vivacité s'élève jusqu'à 1′ et demie de hauteur, semblables à de l'or par leur éclat et par leur couleur jaune qui contraste avec le rouge ordinaire. Au centre de l'arc, se voit

une belle nuée dense et brillante, effilée à son bord inférieur, et à la droite de laquelle se sont formés deux faisceaux de fils brillants qui tombent comme en pluie sur le bord solaire. L'observateur ne put mesurer la vitesse, qu'il évalue à un millier de kilomètres par seconde.

Du reste, l'inclinaison des faisceaux, leur parallélisme avec d'autres plus courts qu'on voit à côté, leur persistance relative montrent, qu'en ce cas, il ne s'agissait pas de pluie, mais d'un changement d'état, d'un phénomène électrique. M. Tacchini fait la même observation à propos des fils plus courts qu'on voit au-dessus du nuage et par côté.

Une coïncidence remarquable, signalée par l'observateur, est celle d'une magnifique aurore boréale, qui fut observée en Europe à cette même date du 7 juillet.

Le même astronome avait été, en août 1871, témoin de phénomènes de pluies solaires ; mais la vitesse de chute des fils et pointes lumineuses, au lieu d'être de l'ordre de grandeur de la vitesse de l'électricité, était relativement faible ; elle n'était que de cent quinze kilomètres par seconde. Le 3 septembre 1871, M. Tacchini observa un cas assez singulier (voy. la figure 2 de la planche IX). C'était un nuage dense et brillant, dont le bord inférieur était frangé de fils curvilignes entrelacés allant rejoindre, mais sans les toucher cependant, les flammes de la chromosphère, plus hautes et plus vives au-dessous de la protubérance qu'ailleurs. Deux arcs lumineux, courbés en sens inverse, se voyaient à ses deux extrémités opposées, l'un s'élevant à plus de 2′ de hauteur ; l'autre fut vu descendant du nuage jusqu'à mi-chemin de la chromosphère, mais sans s'y réunir, présentant la même apparence, mais en sens opposé, que les éruptions si fréquemment observées sur la chromosphère. Par quel mode de formation se produisent de tels phénomènes au sein des masses suspendues dans l'atmosphère du Soleil? c'est ce qu'on ignore.

Les *protubérances à flammes* sont celles qui paraissent

formées par les pointes ou flammes ordinaires de la chromosphère, seulement beaucoup plus élevées; la direction de leurs extrémités est telle, qu'on dirait qu'elles sont attirées par un centre particulier d'aspiration.

Enfin, la figure 1 de la planche IX représente une espèce de protubérances, auxquelles les spectroscopistes italiens donnent le nom de *protubérances mixtes*, parce qu'elles sont composées de parties nébuleuses plus ou moins compactes, et de parties ayant une structure filamenteuse bien marquée. Les jets ou flammes de la chromosphère se terminent, dans la protubérance en question, par des fils brillants en éventail, d'où une longue nuée, repliée vers le bas, s'étend elle-même horizontalement comme une traînée de fumée. Cette apparence suggère à M. Tacchini l'idée d'une action extérieure nécessaire pour expliquer le transport du gaz hydrogène dans une telle direction : on dirait d'un courant dirigé ici de l'équateur vers le pôle Sud.

§ 4. NATURE DES PROTUBÉRANCES.

D'après tout ce que nous venons de voir, il paraît établi que les protubérances ne sont en général que des soulèvements, des extensions de la chromosphère, de cette couche continue d'hydrogène incandescent qui enveloppe la photosphère du Soleil. Des mouvements, dont la cause nous échappe encore, ont lieu soit à l'intérieur, soit à la surface de cette couche, et il paraît en résulter des éruptions de la matière gazeuse, sous des formes extraordinairement variées.

Quelques-unes de ces éruptions semblent du reste avoir une origine beaucoup plus profonde que d'autres; à peu près comme, sur nos océans, les vagues sont l'indice d'agitations qui pénètrent très-inégalement l'intérieur de la masse liquide. Les couches les plus basses de la chromosphère, les plus im-



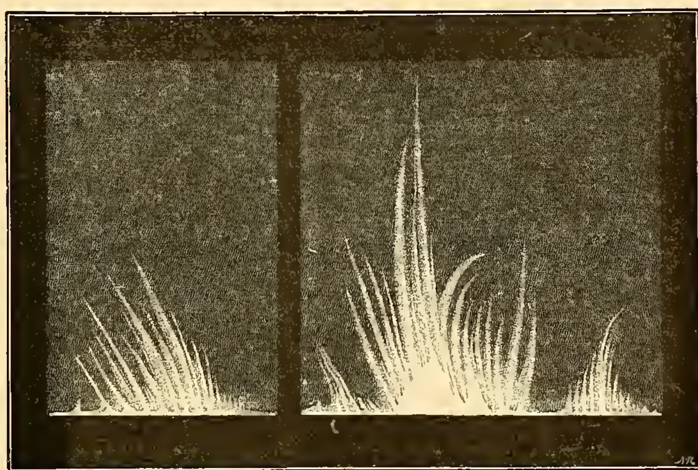
Pralon, Lith Imp Fraillery

PROTUBÉRANCES SOLAIRES

Observées à Palerme, le 8 juillet 1872, par P. Tacchini.

médiatement en contact avec la photosphère, sont, comme on l'a vu, celles où les vapeurs métalliques les plus lourdes sont mêlées à l'hydrogène ; or, parfois les raies brillantes de ces vapeurs, magnésium, sodium, fer, se voient dans le spectre de certaines protubérances. Ce sont celles qu'on désigne sous le nom de protubérances métalliques, et dont la formation est évidemment due aux éruptions des couches les plus profondes de la chromosphère.

Mais toutes les protubérances ont-elles, comme celles-ci,



13 mars 1871, $11^h 11^m$. 13 mars 1871, $11^h 13^m$.

Fig. 53. Protubérances rectilignes ou en forme d'épées, d'après les dessins de P. Tacchini.

une origine interne? C'est ce que ne croit pas un des observateurs les plus persévérants de la spectroscopie solaire, M. P. Tacchini. En dehors des éruptions dont il vient d'être question, ce savant distingue trois catégories de phénomènes protubérantiels, qui ne peuvent être considérés comme dus à des soulèvements ou à des transports de matière. Ce sont : 1° de petits filaments isolés et lumineux qui disparaissent aussi promptement qu'ils se forment; 2° des masses presque toujours filamenteuses, transparentes, en zigzag, sans rapport de structure avec la chromosphère sous-jacente; 3° certaines

protubérances rayonnées qui, d'après leur forme et la rapidité de leur propagation, semblent le produit d'une action électrique.

Les pointes lumineuses, les filets déliés qui se voient le plus souvent à la partie inférieure des nuages des deux premières catégories, la correspondance de ces fils lumineux avec les points de la chromosphère sous-jacente, donnent l'idée d'une attraction électrique, et paraissent des phénomènes étrangers à toute cause éruptive. M. Tacchini croit même que les dentelures de la photosphère sont plutôt produites par un certain état de tension électrique que par l'agitation ou l'élévation de masses enflammées.

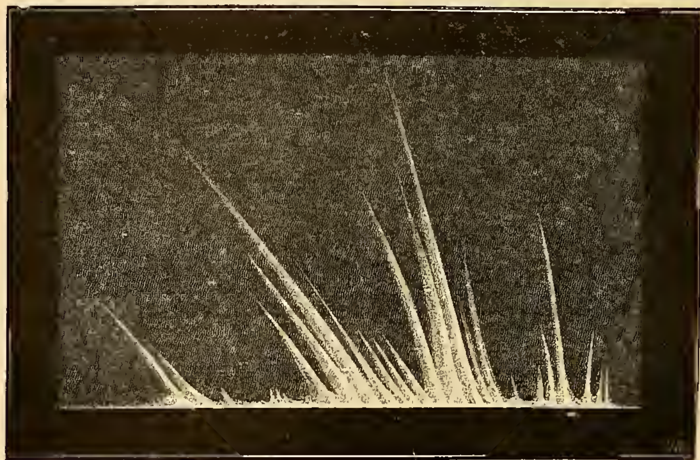


Fig. 54. Protubérances rectilignes, d'après P. Tacchini, 13 mars, à $12^h 10^m$.

Les jets rectilignes ou en forme d'épées (fig. 53 et 54) qu'il a observés en mars 1871, de $11^h 11^m$ à $12^h 10^m$, et dont la hauteur a plus que doublé dans le court intervalle de 2 minutes, ne permettent guère, en effet, de voir là un phénomène de transport matériel. La vitesse n'eût pas été moindre de 5000 kilomètres par seconde, et nous avons été frappés déjà de l'énorme rapidité des mouvements de transport ou d'explosion observés par le professeur Young, rapidité qui cependant

ne s'élevait qu'à 260 kilomètres par seconde, c'est-à-dire était vingt fois moindre que la vitesse observée par l'astronome italien.

Il y a là des phénomènes encore peu étudiés, qui se rattachent peut-être aux perturbations magnétiques et électriques dont le Soleil est le théâtre, comme le semble prouver la concordance observée entre eux et la production des aurores polaires terrestres, concordance signalée par Tacchini.

§ 5. RELATIONS ENTRE LES PROTUBÉRANCES, LES FACULES ET LES TACHES.

On sait quelle relation existe entre les taches et les facules : il est rare d'observer des taches qui ne soient pas accompagnées de facules; mais les facules sans tache sont communes, au contraire, à la surface du Soleil.

Il reste à examiner la question d'une connexion possible entre ces deux genres de phénomènes et les protubérances. Divers observateurs s'en sont spécialement occupés, mais les résultats auxquels ils sont parvenus n'embrassant nécessairement qu'une période limitée de l'activité solaire, ne peuvent être généralisés ni admis que sous toutes réserves. Nous nous bornerons à énoncer les lois provisoires formulées par Respighi. Ces lois sont de deux sortes.

Les premières ont pour objet les relations existant entre les protubérances et les taches. Les autres ont rapport à la distribution des protubérances à la surface du Soleil, et à la comparaison de cette distribution spéciale avec celle qui a été établie pour les taches. On se fera de la sorte une idée des variations de ces phénomènes dans l'espace et dans le temps.

Voici les points établis par les observations de Respighi, en ce qui concerne la connexion entre les protubérances et les taches ou les régions voisines des taches.

1. Dans les régions des taches, la couche rouge (chromosphérique) est très-basse, très-régulière et très-brillante;



Fig. 55. Jets rectilignes dans les protubérances; observation de P. Tacchini, le 21 avril 1873.

2. Au-dessus du noyau, elle est plutôt basse, et peut-être totalement absente;

3. Sur le noyau, on ne voit aucune trace d'éruptions; ou,

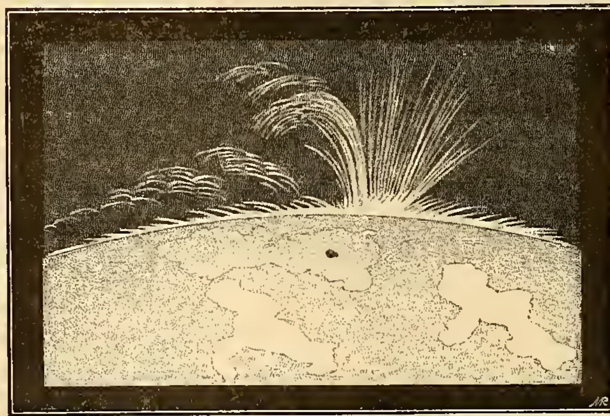


Fig. 56. Facules, pore et jets protubérantiels, d'après Secchi.

s'il y en a, elles sont réduites à des jets déliés et de courte durée;

4. Au-dessus des régions qui entourent les taches, s'élèvent

des jets gazeux, remarquables par leur violence et leur intensité, et en outre de forme nettement définie;

5. Les jets environnant les taches ne sont pas uniquement constitués par de l'hydrogène, mais aussi par d'autres substances, ainsi qu'en témoignent les lignes brillantes de leur spectre;

6. Parmi ces lignes brillantes, qui généralement se trouvent à la base ou sur les plus basses portions des jets, les lignes du sodium, du magnésium et du fer sont souvent ob-

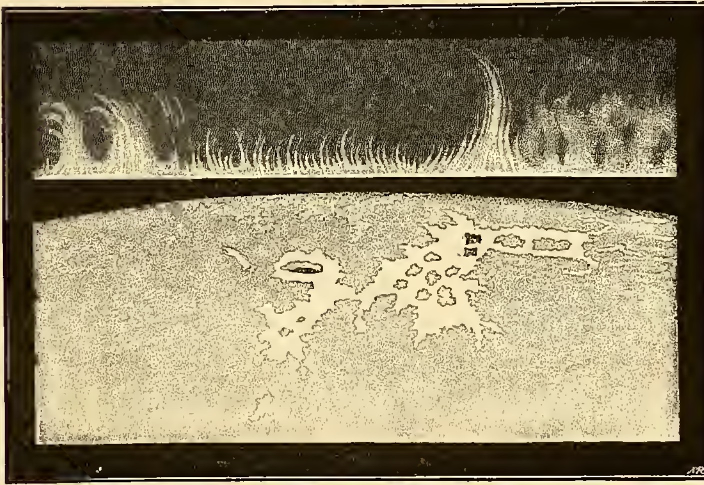


Fig. 57. Taches, facules et protubérances observées le 7 mars 1874, par P. Tacchini.

servées; deux lignes du rouge, l'une entre B et C, l'autre entre B et *a*, s'observent constamment et souvent se prolongent jusque dans la chromosphère; quelquefois elles se montrent jusque dans les parties élevées des jets;

7. De temps à autre, dans le voisinage des taches, les éruptions prennent temporairement des proportions gigantesques; ce sont elles, sans doute, qui produisent les rapides transformations et les déplacements soudains qu'on observe parfois dans les taches elles-mêmes;

8. Dans les régions des taches, se montrent fréquemment

des jets courbés présentant leur concavité vers le disque solaire, de forme nettement parabolique, tantôt isolés, tantôt réunis aux groupes;

9. Les larges jets observés dans le voisinage des taches se développent et disparaissent plus rapidement que dans les autres régions; ils se réunissent promptement à la surface du Soleil.

La faible hauteur, ou même l'absence de la chromosphère au-dessus du noyau des taches, ci-dessus établie par Respighi, serait une confirmation des vues de Lockyer, qui regarde les protubérances comme ayant une connexion réelle, non avec les noyaux, mais avec les facules environnant les taches. Mais c'est un point qui a été contesté, notamment par Secchi, « qui n'a jamais rencontré la chromosphère absente, ni sur les taches ni ailleurs ». Respighi attribue cette différence dans les résultats à la différence des conditions où se trouvait l'activité solaire dans les deux périodes d'observation. Aux époques de grandes perturbations (dans les régions des taches comme ailleurs), l'activité solaire est plus énergique, les irrégularités de la chromosphère plus sensibles et les éruptions plus fréquentes. C'est un fait qui témoigne de la grande influence qu'ont les éruptions sur la production, la transformation et le déplacement des taches; et en effet, à ces époques, l'apparition et la disparition des taches est très-fréquente, et leurs transformations continuelles. Ce qui a fait croire à une plus grande élévation de la chromosphère au-dessus des noyaux, c'est que les protubérances qui environnent les taches se projettent alors sur ceux-là; mais, en réalité, elles ne se trouvent point au-dessus.

Donnons maintenant les résultats que le même astronome a déduits d'une série d'observations qui embrassent plusieurs années, d'octobre 1869 à avril 1872, en faisant, comme lui-même le fait d'ailleurs, toutes les réserves convenables sur la généralité des lois qui, pour être parfaitement établies, exi-

geront des observations beaucoup plus prolongées. Le fait capital est celui-ci, à savoir: que les protubérances, sans être des phénomènes invariablement liés aux taches, dépendent du moins, comme celles-ci, de la rotation solaire, et, de plus, paraissent soumises à une variation périodique analogue.

Voici les résultats formulés par Respighi :

1° Dans les régions circompolaires (notamment à environ 20° des pôles), le phénomène des protubérances ou éruptions solaires n'est jamais observé, ou s'il se voit exceptionnellement dans ces points, ce sont des jets petits et de courte durée. Dans ces régions aussi, la couche rouge et la surface solaire ne peuvent rester dans un état de calme parfait, à cause de la présence des petits jets; et l'irrégularité plus ou moins marquée de la couche témoigne d'un état de continuelle agitation et d'éruption, quoique modérée;

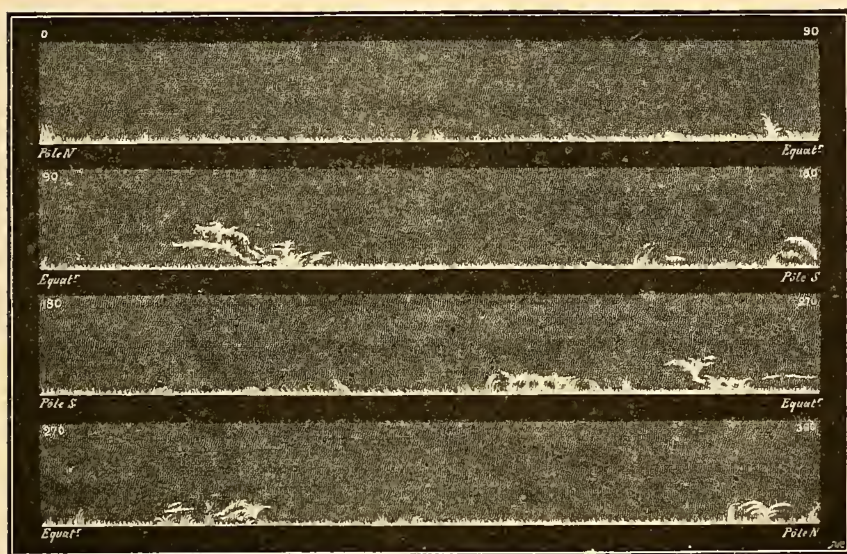


Fig. 58. Protubérances observées sur le contour solaire, le 11 décembre 1871, par P. Tacchini.

2° Dans une zone équatoriale qui s'étend à 20° environ, les protubérances sont moins fréquentes et moins développées que dans les zones de plus haute latitude ;

3° Le phénomène semble avoir une moindre fréquence dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud;

4° Dans l'hémisphère nord, les grandes protubérances, — j'entends celles dont la hauteur n'est pas au-dessous de trois diamètres de la Terre (1'), — sont plus fréquentes dans deux zones qui s'étendent, l'une de 10° à 20° de latitude, l'autre de 60° à 70°, et sont plus rares dans le voisinage de l'équateur et dans une zone comprise entre 30° et 40° de latitude;

5° Dans l'hémisphère sud, la fréquence des grandes protubérances est à peu près constante dans la zone comprise entre 20° et 60°, et décroît rapidement à mesure qu'on approche de l'équateur ou des pôles;

6° Les grandes protubérances se rencontrent plus souvent au pôle Nord qu'au pôle Sud;

7° Dans les hautes latitudes, la forme prédominante des protubérances est celle de larges groupes, de jets déliés ou de filets de lumière, non très-lumineux toutefois, et assez irrégulièrement terminés;

8° Les protubérances voisines des pôles sont moins sujettes aux transformations, et sont beaucoup plus persistantes et durables que celles des basses latitudes;

9° Les époques où se voient de grandes protubérances, au pôle Nord, coïncident surtout avec celles des grandes perturbations magnétiques et des aurores boréales remarquables.

« En exposant ces résultats, ajoute le savant astronome, je n'ai point l'intention d'établir des lois définitives et invariables en ce qui concerne la distribution des protubérances à la surface du Soleil; j'ai voulu seulement montrer une relation entre ces phénomènes et la rotation du Soleil, et la dépendance où elles sont de cet élément; je laisse la détermination de lois mieux définies à des séries d'observations régulières plus prolongées. »

VIII

CONSTITUTION PHYSIQUE DU SOLEIL.

§ 1. QU'EST-CE QUE LE SOLEIL?

On vient de lire l'exposé des faits, la description des phénomènes qui ont leur siége à la surface de l'astre ou hors de son enveloppe photosphérique. Il s'agit maintenant de voir de quelle interprétation ces phénomènes sont susceptibles, si, en les comparant et les coordonnant, il est permis de se faire une idée exacte de ce qu'on nomme la constitution physique du globe solaire, si, en un mot, la science peut répondre d'une façon satisfaisante à la question, aussi simple par l'énoncé qu'elle est en réalité complexe : *Qu'est-ce que le Soleil?*

Les éléments qui concourent à déterminer ce que les savants nomment la constitution physique d'un astre peuvent se grouper en quelques catégories bien distinctes, dont l'énumération va nous fournir les divers paragraphes de ce chapitre.

Il y a d'abord les éléments qu'on peut appeler astronomiques, parce qu'ils dépendent des théories de la mécanique céleste et des observations géométriques relatives aux mouvements, aux dimensions, aux distances. Telles sont la masse, la densité de l'astre, la pesanteur à sa surface. Sous ce rapport, la science peut fournir des données précises, susceptibles, il est

vrai, de perfectionnements ultérieurs, mais dès aujourd'hui calculées avec un degré d'approximation fort satisfaisant.

La physique et la chimie solaires sont moins avancées. Cependant la mesure de la lumière et de la chaleur rayonnées par l'astre, des effets chimiques que ces radiations sont capables de produire à distance sont des éléments à peu près déterminés. On peut se rendre compte de la puissance du foyer de notre monde planétaire, évaluer sa dépense annuelle, remonter par le calcul et par la pensée à de lointaines époques, et pour ainsi dire à l'origine de l'astre ; on peut se faire une idée nette du grand problème qui a pour objet l'explication de la constance relative de l'activité du Soleil. Cependant sur certains points l'incertitude est grande encore ; les savants ne s'accordent guère, par exemple, sur l'évaluation de la température probable de l'astre : c'est une question qui reste à l'étude.

Le spectroscope, on l'a vu, fournit des renseignements du plus haut intérêt sur la composition chimique des matériaux du Soleil et de son atmosphère.

Mais, en définitive, qu'est-ce que le Soleil ? Est-ce un globe solide, ou liquide incandescent, ou bien n'est-ce qu'une agglomération de gaz condensés, dont les mouvements intestins produisent à la surface les phénomènes des taches, au dehors ceux des éruptions ou des soulèvements d'hydrogène qu'on nomme les protubérances ? Quel rôle les diverses forces physiques ou chimiques, la force magnétique, l'électricité jouent-elles dans ces grandioses phénomènes ? Telles sont les questions encore pendantes auxquelles les astronomes et les physiciens ont cherché à répondre par diverses hypothèses. Une théorie qui rendrait compte de tous les faits précédemment exposés serait la théorie vraie, sinon complète, des phénomènes solaires, nous révélerait la constitution physique véritable de l'immense sphère, et serait elle-même la réponse à la question plus haut posée : qu'est-ce que le Soleil ?

§ 2. MASSE ET DENSITÉ DU SOLEIL. — INTENSITÉ DE LA PESANTEUR A SA SURFACE.

Résumons en premier lieu les éléments astronomiques relatifs au globe du Soleil. Déjà nous savons quelle est sa distance, quelles sont ses dimensions, quel est son volume, quelle est enfin la durée de son mouvement de rotation; continuons à recueillir les autres données positives, c'est-à-dire indépendantes de toutes les hypothèses.

Il en est une qu'on obtient par une conséquence immédiate de la loi de gravitation : nous voulons parler de la masse du Soleil, du poids de l'immense globe comparé aux poids des planètes, par exemple à celui de la Terre. Que les astronomes aient la prétention de connaître les poids des corps célestes, de dire combien il faudrait mettre de Terres dans l'un des plateaux d'une balance pour tenir en équilibre le Soleil, posé dans l'autre plateau, c'est ce qui paraîtra certainement paradoxal à beaucoup, et j'ajoute que la surprise manifestée, à cette occasion, par les personnes qui n'ont point étudié la mécanique céleste, est tout à fait naturelle. Annoncer que je tâcherai plus loin de faire saisir la possibilité de conclusions en apparence si audacieuses, pourra même sembler entaché de présomption. Je me trouve donc obligé, en attendant mieux, d'invoquer un sentiment qui n'est guère de mise, quand il s'agit de science, la foi dans la vérité des assertions qui vont suivre. Cette foi-là, d'ailleurs, n'est pas de celles qui s'abritent sous l'impénétrabilité des mystères : en étudiant, elle devient lumière et vérité démontrée.

Comparée à la masse de la Terre, la masse du Soleil est environ 325 000 fois aussi grande, tandis que son volume, on l'a vu plus haut, est un million deux cent soixante-dix-neuf mille fois aussi gros. Cela indique une moindre densité. La

matière que compose le Soleil ne pèse donc guère, à volume égal, que le quart de la matière dont notre propre globe est formé : en prenant pour unité la densité de la Terre, on trouve 0,2537 pour celle du Soleil. Rapportée à l'eau, la densité du Soleil est 1,367. La houille la plus compacte a pour densité 1,360 ; celle du phosphore est 1,77. Ainsi le Soleil pèse un peu plus qu'un globe de houille de mêmes dimensions, notablement moins qu'un globe de phosphore. Évalué en tonnes de mille kilogrammes, le poids du Soleil serait représenté par le nombre suivant :

1 879 000 000 000 000 000 000 000 000

Il rentre, on le voit, dans la catégorie de ces nombres dont l'effrayante grandeur ne dit plus rien à l'esprit, et laisse l'imagination elle-même impuissante.

A la surface de la Terre, un corps librement abandonné à lui-même tombe dans le vide avec une vitesse accélérée, qui, au bout d'une seconde, est à Paris de $9^m,8094$. L'espace qu'il a parcouru jusque-là est moitié moindre, ou égal à $4^m,9047$. C'est cette vitesse acquise qui sert de mesure à l'énergie de la pesanteur terrestre : elle dépend de la masse de la Terre, laquelle est invariable; elle dépend aussi de la distance du corps ou du point de départ de la chute au centre de la Terre. Or, le même élément étant calculé d'après la masse supposée connue et les dimensions d'un corps céleste, on obtient un nombre qui marque quelle serait la vitesse acquise par un corps grave, après une seconde de chute à la surface de l'astre. A la surface du Soleil, cette vitesse acquise est 27 fois $\frac{1}{2}$ celle d'un corps tombant à la surface de notre planète, c'est-à-dire égale à $269^m,50$. L'espace parcouru pendant la première seconde de chute est moitié de cette vitesse ou $134^m,75$.

Ainsi les corps, à la surface du Soleil, pèsent plus de 27 fois autant qu'à la surface de la Terre. Cela veut dire que si l'on

transportait sur le Soleil un poids d'un kilogramme, qui sur la Terre tend le ressort d'un dynamomètre jusqu'à la division marquant 1 kilogramme, ce poids y tendrait le même ressort jusqu'à la division correspondant à 27^{k},50. « Les projectiles de l'artillerie, dit M. Liais, n'y auraient donc que très-peu de portée. Ils décriraient des lignes présentant une grande courbure et toucheraient le sol à quelques mètres de la pièce. » Dès lors, il faudrait une charge de poudre beaucoup plus grande, pour obtenir une portée égale à celle des pièces d'artillerie terrestres.

Sur la Terre, la force centrifuge due à la rotation du globe diminue la pesanteur dans une proportion, qui va en croissant à mesure qu'on s'approche de l'équateur. En un point de l'équateur même, la diminution totale est de $\frac{1}{289}$. A la surface du Soleil, la force centrifuge à l'équateur n'est guère que la 18 000e partie de la gravité. Il faudrait que le Soleil tournât sur lui-même 133 fois plus vite, pour que la gravité y fût contre-balancée et que le poids d'un corps y fût nul. Un mouvement de rotation 17 fois plus rapide suffirait, sur la Terre, pour produire le même résultat.

Les données précédentes n'offrent pas seulement un intérêt de curiosité; elles sont importantes pour l'interprétation des phénomènes que nous avons vus se manifester journellement à la surface du Soleil. Les mouvements, les agitations, les éruptions de matières hydrogénées, de vapeurs métalliques au-dessus de la photosphère, peuvent être comparés à des phénomènes terrestres analogues; mais à la condition qu'on tienne compte de l'intensité de la pesanteur, des pressions qu'elle doit déterminer dans les différentes couches dont l'atmosphère solaire est composée. Il en est de même, si l'on veut se faire une idée de la constitution de la masse interne, sur laquelle, comme on va le voir bientôt, on n'a pu encore formuler que des conjectures.

§ 3. LES RADIATIONS SOLAIRES : LUMIÈRE, CHALEUR, ACTIVITÉ CHIMIQUE.

Considéré comme source rayonnante, comme foyer de lumière et de chaleur, le Soleil est doué d'une énergie prodigieuse, qu'on est parvenu à évaluer approximativement, bien qu'elle dépasse tout ce que l'imagination la plus hardie eût osé concevoir.

D'après les expériences de Wollaston et de Bouguer, le pouvoir éclairant du Soleil équivaut à celui d'environ 70000 bougies placées à un mètre de distance de l'objet éclairé. On suppose le Soleil au zénith, vu par un ciel bien pur; mais il ne s'agit là que de l'éclat de sa lumière à la surface du sol, et les couches atmosphériques en absorbent dans ce cas près des deux dixièmes. Comparée au pouvoir éclairant de la lumière d'un arc voltaïque produit par trois séries de 46 couples Bunsen, l'intensité de la lumière solaire est environ deux fois et demie aussi forte. Quant à l'éclat intrinsèque, il est au moins, d'après Arago, 33000 fois celui d'une bougie : mais il ne s'agit là que d'une limite inférieure, et M. E. Becquerel a déduit des expériences de Bouguer et de Wollaston que l'éclat intrinsèque de la lumière solaire est environ 180000 fois aussi intense que celui d'une bougie.

Huygens estimait la lumière du Soleil au moins égale à 765 millions de fois celle de Sirius. D'après Wollaston, elle est de beaucoup supérieure à ce nombre, et il l'évalue égale à 20 milliards de fois la lumière de la même étoile, qui est la plus brillante du ciel entier. Il résulte de là que, pour voir le Soleil se réduire à un point lumineux dont l'éclat serait égal à celui de Sirius, il faudrait que la Terre s'éloignât dans l'espace à une distance d'environ 140000 fois sa distance actuelle à l'astre radieux. Inversement, si Sirius s'approchait de nous,

de manière à prendre la place de notre Soleil, sa lumière équivaudrait à celle de 94 soleils semblables au nôtre ! Enfin, comparée à l'éclat de la pleine Lune, la lumière du Soleil est 800 000 fois plus éclatante que celle du disque lunaire (Wollaston). Cela revient à dire qu'il faudrait 800 000 pleines lunes dans le ciel pour produire un jour aussi éclatant que celui du Soleil sans nuages.

J. Herschel, Pouillet, et après eux divers physiciens ont mesuré l'intensité de la chaleur solaire à la surface du sol terrestre ; il résulte de leurs expériences et de leurs calculs [1] que la Terre reçoit en une année une quantité de chaleur qui surpasse douze cents quintillions de calories (une *calorie* est la chaleur nécessaire pour élever de 1° la température d'un kilogramme d'eau). Mais le Soleil ne rayonne pas seulement sur la Terre, et pour avoir l'intensité totale de sa radiation dans l'espace, il faut multiplier le nombre précédent par 2 150 000 000. On trouve alors, d'après Pouillet, que « si la quantité totale de chaleur émise par le Soleil était exclusivement employée à fondre une couche de glace qui serait appliquée sur le globe solaire et l'envelopperait de toutes parts, cette quantité de chaleur serait capable de fondre en une minute une couche de 11^{m},80 d'épaisseur, en un jour une couche de 17 kilomètres. » Cette même quantité de chaleur, dit Tyndall, « ferait bouillir par heure 2900 milliards de kilomètres cubes d'eau à la température de la glace. Exprimée sous une autre forme, la chaleur émise par le Soleil en une heure est égale à celle qui serait engendrée par la combustion d'une couche de houille de 27 kilomètres d'épaisseur. »

John Herschel a encore fait la comparaison suivante, qui, sous une forme originale, montre quelle est l'activité de l'immense foyer dont la Terre absorbe une fraction au plus égale à 1/2 150 000 000 :

1. Voyez à ce sujet notre monographie du *Soleil*, pages 19 et suiv.

« Imaginons, dit-il, qu'une colonne cylindrique de glace de 18 lieues de diamètre soit incessamment lancée dans le Soleil, et que l'eau fondue soit aussitôt enlevée. Pour que toute la chaleur solaire fût employée à la fusion de la glace, sans qu'aucun rayonnement extérieur se produisît, il faudrait lancer le cylindre congelé dans le Soleil avec la vitesse de la lumière. Ou si l'on veut, la chaleur du Soleil pourrait, sans diminuer d'intensité, fondre en une seconde de temps une colonne de glace de 4120 kilomètres carrés de base et de 310 000 kilomètres de hauteur ! »

Pour donner enfin une idée de cette prodigieuse activité calorifique, supposons qu'elle soit convertie en puissance mécanique, et évaluons la somme des forces qu'engendrerait, à la surface de la Terre seule, la fraction si minime de la chaleur solaire reçue par notre planète. Nous trouvons alors qu'en une année, chaque mètre carré de la surface de la Terre reçoit 2 318 157 calories : c'est plus de 23 millions de calories par hectare, c'est-à-dire 9 852 200 000 000 kilogrammètres. Ainsi la radiation calorifique du Soleil, en s'exerçant sur la superficie d'un de nos hectares, y développe sous mille formes diverses une puissance qui équivaut au travail continu de 4163 chevaux-vapeur. Sur la Terre entière, c'est un travail de 217 316 000 000 000 chevaux-vapeur.

543 milliards de machines d'une force effective de 400 chevaux, travaillant sans relâche le jour et la nuit, voilà donc ce que vaut, pour notre planète seule, la radiation calorifique du Soleil.

En analysant les radiations solaires, les physiciens ont démontré qu'on peut les ranger en trois classes, selon que les effets produits par elles sont calorifiques, lumineux ou chimiques. On vient de voir quelle est l'intensité des deux premières, il reste à dire quelle est la puissance des radiations chimiques. Deux chimistes contemporains, Bunsen et Roscoe, ont

trouvé que cette puissance peut se mesurer par le volume d'un mélange de gaz hydrogène et de chlore que l'action des rayons solaires pourrait transformer en gaz acide chlorhydrique. Voici à quel résultat ils sont parvenus :

En une année, la couche de gaz acide chlorhydrique que les radiations chimiques du Soleil auraient la puissance de combiner, sur toute la surface du globe terrestre, atteindrait une épaisseur de 4600 kilomètres. Convertie en chaleur, cette puissance donnerait plus de 4000 fois le nombre de calories provenant de la radiation calorifique du Soleil, et on a

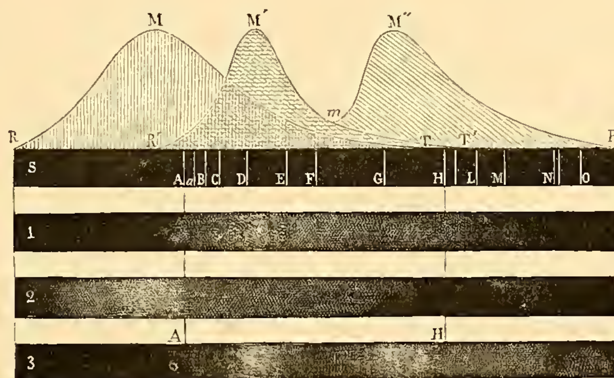


Fig. 59. Spectres calorifique, lumineux et chimique de la lumière solaire.

1. Spectre calorifique RMT. 2. Spectre lumineux R'M'T'. 3. Spectre chimique R'M'mM''P.

vu plus haut cependant quelle énorme quantité de chaleur le globe terrestre reçoit directement dans le cours d'une année.

En présence de ces résultats de l'expérience et du calcul qui témoignent, à un si haut degré, de la puissance de la radiation solaire, on devait se poser ces questions : Quelle est l'origine de la lumière et de la chaleur du Soleil? Comment s'entretient cette source qui, si l'on ne tenait compte que de la permanence de ses effets dans le cours des siècles historiques, semblerait inépuisable? Ne finira-t-elle point par s'affaiblir et s'épuiser un jour?

L'incandescence du Soleil ne peut être produite par une simple combustion, car les matières qui le composent sont de même nature, on le verra plus loin, que les substances terrestres; or il n'est pas douteux que leur énergie chimique ne pourrait suffire à entretenir l'incandescence solaire. « Si le Soleil était un bloc de houille, dit Tyndall, et qu'on lui fournît assez d'oxygène pour le rendre capable de brûler au degré de la radiation observée, il serait entièrement consumé en 5000 ans. » D'autre part, s'il ne répare point ses pertes, en lui supposant la chaleur spécifique de l'eau, le refroidissement de sa masse totale serait de plus d'un degré par année.

On a supposé que le frottement contre l'éther, provenant du mouvement de rotation, pouvait compenser la dépense de chaleur du Soleil; mais la force totale de la rotation solaire, fût-elle convertie en chaleur, ne pourrait suffire, à plus de deux siècles de la radiation. Une hypothèse plus hardie et plus vraisemblable est celle qu'avait émise un physicien anglais contemporain, W. Thomson : ce savant pensait que la radiation solaire est entretenue par une chute incessante, par une pluie continue de météorites à la surface du Soleil, le mouvement de chacun de ces corpuscules se transformant nécessairement en chaleur au moment de la chute[1]. Mais il abandonna cette théorie parce qu'elle supposait, dans le voisinage du Soleil, l'existence d'un milieu assez résistant pour

1. Voici comment Thomson lui-même rend compte à la fois et du phénomène qu'il regardait comme la cause de l'entretien de la chaleur solaire et des raisons nouvelles qui la lui ont fait abandonner : « Des considérations purement dynamiques m'avaient amené depuis longtemps à abandonner comme très-improbable l'idée que la chaleur du Soleil est reproduite d'une manière dynamique par les météores qu'il reçoit chaque année. Mais maintenant l'analyse spectrale vient trancher définitivement la question contre cette hypothèse. Chaque météore qui circule autour du Soleil doit, dans sa chute vers ce globe, suivre une ligne spirale presque insensible; avant d'arriver sur le Soleil, il a dû se trouver, pendant fort longtemps, exposé à une chaleur de rayonnement énorme, et doit par conséquent avoir été réduit en vapeur avant de toucher la surface solaire. Ainsi, en admettant l'hypothèse de

troubler les mouvements des comètes à leur passage au périhélie, hypothèse démentie par l'observation.

L'hypothèse aujourd'hui la plus probable est celle qui attribue l'origine et l'entretien actuel de la puissance rayonnante du Soleil à la transformation de la force de gravité en chaleur et lumière. A l'origine, le monde solaire tout entier[1] était une nébulosité immense dont les molécules se sont peu à peu réunies en un centre principal sous l'influence de la force de gravitation dont elles étaient douées. La conversion en chaleur de cette force, d'après les calculs d'Helmholtz et de Thomson, est suffisante pour rendre compte en totalité, pendant une longue série de siècles, de l'énorme radiation calorifique, lumineuse et chimique du Soleil. Mais il est possible, il est probable même que le Soleil se refroidit, que son approvisionnement peu à peu diminue, et que d'année en année, de siècle en siècle, sa radiation s'affaiblit, de sorte qu'on doit prévoir un temps où ses radiations seront éteintes, où la vie, qui ne pourrait subsister sans elles à la surface des planètes, aura disparu. Il ne paraît pas que le Soleil rayonne ainsi depuis plus de 500 millions d'années, et, d'après Helmholtz, il a dépensé déjà les $\frac{453}{454}$ de sa puissance en chaleur : mais n'eussions-nous encore devant nous qu'une période 500 fois moins longue, la perspective serait néanmoins rassurante pour bien des générations humaines, et la vie persisterait sur notre Terre pour une longue suite d'âges.

Mayer, c'est le frottement entre les tourbillons de vapeurs météoriques et l'atmosphère du Soleil qui doit être la cause immédiate de la chaleur solaire; alors la vitesse avec laquelle ces vapeurs circulent autour de l'équateur du Soleil doit être d'au moins 435 kilomètres par seconde. Or, la vitesse relative maxima trouvée par Lockyer, d'après l'observation spectrale, pour différentes vapeurs dans l'atmosphère du Soleil, est à peine égale au vingtième de ce chiffre. » (Discours prononcé en 1871 à l'Association britannique pour l'avancement des sciences.)

1. Voir, dans la troisième partie du CIEL, le chapitre intitulé : *Origine et formation du monde solaire.*

§ 4. TEMPÉRATURE DU SOLEIL.

L'énergie de la radiation calorifique du Soleil a pu être mesurée avec une certaine approximation, nous venons de le voir. Mais les données ainsi obtenues ne nous renseignent pas sur un point qui aurait une grande importance, je veux dire sur la température intrinsèque qui règne, soit à la surface de l'immense globe, soit dans les profondeurs de sa masse. Si ce problème parvenait à être résolu, on saurait s'il y a quelque analogie entre cette source si prodigieusement puissante et les sources de chaleur que nous produisons à la surface de la Terre, et dont l'origine est dans les actions chimiques ou électriques.

Malheureusement on est réduit à des conjectures, parce que certains éléments font défaut. Il faudrait connaître le pouvoir émissif du Soleil, et tout ce que l'on peut faire, c'est de le supposer compris entre certaines limites. C'est ce qu'a fait Pouillet, qui est arrivé à la conclusion suivante : en supposant le pouvoir émissif du Soleil égal à l'unité, sa température est au moins de 1461°, c'est-à-dire à peu près celle de la fusion du fer; elle pourrait être de 1761°, si le pouvoir émissif du Soleil était analogue à celui des métaux polis.

Dans l'hypothèse proposée par M. Faye et qui considère la masse entière du Soleil comme gazeuse, la température des couches internes dépasse de beaucoup celle où les actions chimiques commencent à s'exercer. Mais, selon lui, quelle que soit cette température, le pouvoir émissif de la masse doit être très-faible et ses radiations toutes superficielles, puisque chaque couche jouit d'un pouvoir absorbant spécial pour les rayons émis par les couches inférieures. « En fait, dit-il, la température à la surface du Soleil est loin d'être aussi élevée que sa température interne. Des mesures de M. Pouillet sur

l'intensité actuelle de la radiation solaire, M. Thomson déduit que la chaleur émise n'est que de 15 à 45 fois supérieure à la chaleur engendrée dans le foyer de nos locomotives. »

Les observations spectroscopiques ont appris qu'il existe, au-dessus de la photosphère, une immense couche de gaz hydrogène à l'état d'incandescence, d'où s'élèvent de temps à autre les colonnes gazeuses de même nature qui constituent ce qu'on nomme les protubérances rouges. Si l'on peut appliquer à la combustion de ces masses ce qu'on sait de la combustion de l'hydrogène à la surface de la Terre, il faudrait en conclure que la température du Soleil, au moins à sa périphérie, n'est pas moindre de 2500°.

Cette question, encore si obscure, de la température du Soleil, soit à la surface de la photosphère, soit à l'intérieur de la masse, a été récemment soulevée au sein de l'Académie des sciences de Paris. Donnons un court résumé de cet intéressant débat.

Le directeur de l'Observatoire du collége romain, Secchi, se basant sur de nouvelles expériences relatives à la radiation solaire à la surface de la Terre, expériences dues à MM. Soret, Waterston et à lui-même, en concluait, pour la température du Soleil, un nombre énorme de plusieurs millions de degrés[1]. Une assertion aussi extraordinaire, dont la signification physique échappe, devait rencontrer des contradicteurs. Déjà le docteur Zœllner, qui regarde le Soleil comme une masse solide recouverte d'une mince couche liquide de lave en fusion, combattait les affirmations de l'astronome romain et évaluait à 27 000° seulement la température de la surface solaire. Ainsi Pouillet trouvait 1500 à 1600°, M. Zœllner 27 000° et Secchi 10 000 000° pour la température du So-

1. 3 987 075° d'après les expériences de Soret, ou 5 334 840° en tenant compte de l'absorption atmosphérique. D'après celles de Waterston, Secchi arrive à 9 ou 10 millions de degrés. D'après Ericsson, la température solaire serait comprise entre 2 ou 3 millions de degrés.

leil. Voilà trois résultats tellement différents les uns des autres, qu'il était impossible de les concilier et qu'il fallait avouer l'insuffisance de la science sur ce point intéressant de physique céleste.

Mais la discussion réduisit bientôt à leur valeur les conclusions exagérées que nous venons de citer. Divers savants, parmi lesquels M. Vicaire, montrèrent que les formules employées avaient été inexactement appliquées, et qu'en définitive la température du Soleil, sans qu'on puisse assigner encore à cet élément un chiffre précis, était entièrement comparable aux températures de nos flammes. MM. H. Sainte-Claire Deville et Berthelot, s'appuyant sur des considérations dont le développement ne serait point ici à sa place, évaluent en définitive à 2500° ou 3000° la température de la surface solaire. Enfin M. Violle, reprenant à nouveau les expériences sur la radiation solaire, et tenant compte de l'influence de l'atmosphère, a trouvé pour la température moyenne de la surface du Soleil, une valeur de 2000 degrés.

Il y a d'ailleurs, on le comprendra, bien des réserves à faire sur les résultats trouvés à la surface de la Terre, quelle qu'en soit la méthode, et appliqués à un milieu dont les conditions physiques et chimiques sont si différentes de tous les phénomènes terrestres analogues. Il est probable que la température, dans le Soleil, est loin d'être uniforme. Qu'est-elle au sein de l'énorme masse, dans les couches profondes, sous-jacentes à la photosphère? Dans la photosphère, n'y a-t-il pas de grandes différences entre la température des éléments lumineux ou granulations, et celles des milieux sans doute gazeux qui les séparent, entre celle des pénombres des taches et des noyaux? La température de la chromosphère est-elle aussi uniforme partout? N'est-elle pas sujette à des variations qui correspondent aux changements si rapides qu'on y observe, et qui, tantôt la montrent comme une simple couche hydrogénée à l'état d'incandescence, tantôt la modifient en intro-

duisant violemment les lourdes vapeurs métalliques de fer, de sodium, de magnésium de ses couches les plus basses[1] ? Les réponses à ces diverses questions restent encore douteuses, comme celle de la température à la surface. Voici néanmoins quelques résultats sur la température relative des diverses régions du Soleil.

D'après les observations faites en 1852 par Secchi, il y aurait lieu de croire que les diverses régions de la surface solaire ne sont point à la même température. Citons textuellement ses conclusions :

« 1° Les régions équatoriales sont à une température plus élevée que les régions situées au delà du 30e degré de latitude, et la différence est au moins de $\frac{1}{16}$.

« 2° La température est un peu plus élevée dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud. »

Herschel avait aussi soupçonné qu'un hémisphère du Soleil rayonnait moins de chaleur et de lumière que l'hémisphère opposé; mais il considérait deux des faces que le Soleil présente successivement à la Terre, non pas les hémisphères que sépare l'équateur de l'astre.

Le directeur de l'Observatoire romain a comparé la température des taches à celle des parties lumineuses de la photosphère, ainsi qu'à celle des facules; il a trouvé que les taches sont les parties les moins chaudes de la surface; mais il n'y a pas de différence appréciable entre les facules et la photosphère. M. Chacornac a également reconnu l'infériorité des

1. Le Dr Zœllner a publié en 1871 un mémoire intéressant où il cherche à résoudre quelques-unes de ces questions. Il part du fait constaté par divers observateurs, des mouvements d'ascension et de l'altitude de certaines protubérances, qu'il considère comme dues à l'expansion soudaine des gaz renfermés et comprimés à l'intérieur du Soleil. Des considérations de thermodynamique le conduisent ainsi à calculer une température de 27 000° pour les couches inférieures de la photosphère en contact avec le noyau liquide interne, et en moyenne de 85 000° pour la température de ce noyau lui-même. C'est le premier de ces résultats que nous avons mentionné plus haut.

taches sous le rapport de la température; mais, selon cet observateur, les facules qui succèdent à une tache ont, au contraire, une température plus élevée que la photosphère.

Ces recherches importantes ont été reprises tout récemment par M. Langley. L'image du Soleil, donnée par une lunette équatoriale de $0^m,33$ d'ouverture, pouvait être amplifiée depuis $0^m,60$ jusqu'à 4 mètres de diamètre. Des piles thermo-électriques très-petites et très-sensibles pouvaient être placées dans toutes les parties de l'image. Voici quels ont été les résultats principaux obtenus à l'aide de cette méthode perfectionnée d'expérimentation. M. Langley a reconnu d'abord, ainsi qu'on l'avait déjà trouvé, que la radiation calorifique d'une tache est en général moindre que celle d'une aire égale de sa photosphère; mais si la portion de la photosphère comparée au noyau noir d'une tache est prise près du bord, la différence de radiation est presque nulle. A $0',5$ du limbe, et dans toute la périphérie de la surface solaire, « la photosphère brillante donnait près du bord absolument moins de chaleur que le noyau noir des taches. »

On sait que l'intensité lumineuse du disque varie, du centre où elle est maximum aux bords où elle est la plus faible, que cette diminution est l'indice d'une absorption particulière à l'atmosphère solaire. Bouguer l'avait évaluée à $\frac{3}{8}$, F. Arago seulement à $\frac{1}{40}$, Chacornac et Secchi à plus des $\frac{3}{4}$, du moins pour les points de l'extrême bord. La chaleur est absorbée comme la lumière; mais est-ce suivant la même loi? M. Langley a trouvé que la loi n'est pas la même et que, généralement, l'absorption de la chaleur est moindre que celle de la lumière, et cette différence va en croissant vers les bords. En admettant, avec W. Herschel, que l'intensité lumineuse du noyau d'une tache est 0,007 de la photosphère, il arrive à conclure que le noyau relativement noir d'une tache nous envoie au moins cinquante fois plus de chaleur que de lumière.

Enfin, ayant exploré les diverses régions du disque, situées

de part et d'autre de l'équateur solaire, M. Langley n'a pu constater les différences signalées par Secchi, sous le rapport des radiations calorifiques. Il n'a pu trouver de différence de température en rapport avec la latitude. Cette divergence dans les résultats nécessitera de nouvelles recherches.

IX

CONSTITUTION PHYSIQUE DU SOLEIL.

§ 1. ANCIENNES HYPOTHÈSES SUR LA CONSTITUTION PHYSIQUE DU SOLEIL.

Avant la découverte des taches et des autres accidents de la surface du Soleil, on n'avait fait, on n'avait pu faire sur la nature de l'astre que des conjectures vaines, dénuées de preuves, sinon de toute vraisemblance. D'ailleurs l'état des sciences astronomiques et physiques ne comportait point la solution d'une question si élevée.

Dans l'antiquité régnait l'idée de l'incorruptibilité des astres. Des philosophes tels que Zénon, Anaximandre, Diogène Laërce faisaient du Soleil, comme de toutes les autres étoiles, un feu pur, immatériel, n'ayant pas besoin d'aliment, et dès lors incorruptible et inextinguible. L'opinion d'Anaxagore, qui assimilait le Soleil à une masse de fer rouge, à une pierre enflammée, fut une opinion hardie, presque une impiété.

Képler, avant la découverte des taches, ne fait sur le même sujet que de vagues, et on peut le dire sans manquer de respect à ce grand génie, d'insignifiantes hypothèses. Mais deux ou trois ans s'étaient à peine écoulés depuis cette révélation du télescope, que Képler regardait les taches comme des fumées ou des nuages, peut-être des exhalaisons de la sur-

face solaire. Il basait cette analogie sur le fait constaté par Scheiner, nié cependant par Galilée, de l'inégalité du mouvement angulaire des taches.

Galilée considérait bien aussi les taches comme des fumées ou des nuages, mais il les faisait flotter comme de l'écume ou des scories sur la surface lumineuse de l'astre, c'est-à-dire sur un océan de matière subtile ou fluide. Ce fut aussi l'opinion d'Hévélius, et nous retrouverons de nos jours la même hypothèse plus ou moins modifiée.

C'est du reste un point commun à toutes les théories imaginées pour expliquer les taches, que de regarder la photosphère comme une matière fluide et lumineuse : leurs auteurs ne s'expliquent pas toujours clairement pour dire si cette fluidité est l'état liquide ou l'état gazeux incandescent; mais la mobilité de la surface est admise par tous. Quant aux taches, ce sont tantôt des masses fixes, des éminences ou inégalités du corps opaque intérieur du Soleil, tantôt des scories ou matières bitumineuses lancées par des volcans, tantôt des corps solides et irréguliers flottant à la surface. La première hypothèse est celle de Fontenelle, adoptée ensuite par Lalande : les marées de la masse fluide et transparente couvraient et découvraient tour à tour les rochers obscurs; les parties complétement émergées formaient les noyaux des taches; celles que recouvrait une faible profondeur du fluide se voyaient encore par transparence et constituaient les pénombres. Les facules, les divisions des taches, les contours tranchés et plus sombres à l'extérieur des pénombres restaient inexpliqués. Mais il est inutile de développer les raisons qui font aujourd'hui rejeter absolument cette première hypothèse, que Lalande soutenait pour expliquer le retour, après un grand nombre de révolutions, de certaines taches aux mêmes points du disque.

L'hypothèse des scories volcaniques a été soutenue par Durham et Wollaston; celle des corps solides et flottants, d'ori-

gine inconnue, le fut par La Hire, puis par Maupertuis, qui expliquaient leur disparition par l'action de la masse fluide incandescente « où ces corps se consument ». Enfin, il y eut encore une hypothèse faisant des taches des scories ; mais au lieu d'avoir une origine volcanique, ces scories n'étaient, comme le dit Cassini, que les parties hétérogènes et plus grossières qui se trouvaient renfermées dans la masse fluide, et que les agitations de celle-ci accumulaient à la surface, puis divisaient et dissipaient ensuite, après leur avoir fait prendre toutes les apparences que peut présenter une même tache.

§ 2. THÉORIE DES TACHES DE WILSON, BODE ET W. HERSCHEL.

Il n'est pas nécessaire de discuter les hypothèses dont nous venons de donner une idée sommaire. Elles apparaissent évidemment comme fausses ou du moins comme incomplètes.

Une théorie mieux conçue et plus étudiée est celle que Wilson, Bode et Herschel ont élaborée au siècle dernier, et qui, aujourd'hui encore, est en partie admise par divers astronomes. Laissons là l'histoire, d'ailleurs fort instructive, des phases par lesquelles a passé cette théorie, et bornons-nous à l'exposé qu'en a fait Arago, il y a vingt-cinq ans, dans son *Astronomie populaire*.

En quoi elle se distingue immédiatement des théories antérieures, c'est qu'elle considère les taches, non plus comme des corps émergeant ou flottant sur la photosphère, mais bien comme des ouvertures, des cavités existant momentanément dans l'enveloppe lumineuse et laissant voir les parties intérieures, moins brillantes, du globe solaire. Ce globe tout entier serait lui-même formé de la manière suivante :

C'est d'abord, intérieurement, un noyau sphérique, relativement obscur, entouré à une certaine distance d'une première atmosphère *b b b* (fig. 60), qui peut être comparée à

l'atmosphère terrestre, lorsque celle-ci est le siége d'une couche continue de nuages opaques et réfléchissants. Si on place de plus, au-dessus de cette première couche, une seconde atmosphère lumineuse *a a*, qui prendra le nom de *photosphère*, cette photosphère, plus ou moins éloignée de l'atmo-



Fig. 60. Explication des taches, noyaux et pénombres dans l'hypothèse de Wilson. A, tache avec noyau et pénombre; B, noyau sans pénombre; C, pénombre sans noyau; *a a*, photosphère; *b b b*, atmosphère nuageuse.

sphère nuageuse intérieure, détermine par son contour les limites visibles de l'astre.

Voyons maintenant comment cette hypothèse rend compte des apparences que présentent les taches solaires et les parties sombres ou lumineuses du disque.

Si l'on imagine qu'à la surface du noyau obscur il se forme de temps à autre des masses gazeuses, dont une haute tem-

pérature amène la déflagration; ou encore, s'il existe à la même surface des foyers d'éruptions volcaniques, les jets provenant de ces foyers déchirant successivement les deux atmosphères du Soleil, produiront des trouées d'une étendue plus ou moins considérable, des vides, à travers lesquels on pourra voir le noyau central. Ces ouvertures doivent avoir plus généralement la forme d'un cône irrégulier, évasé à sa partie supérieure, laissant voir à sa base la plus étroite la partie solide et obscure du Soleil, et tout autour, l'atmosphère nuageuse, de couleur grisâtre. De là les taches noires, environnées de leurs pénombres. Mais il peut arriver que l'ouverture pratiquée ainsi dans la photosphère ait une moindre étendue que celle de l'atmosphère nuageuse. Dans ce cas, le noyau noir sera seul visible, et c'est ainsi que se trouvent expliqués les noyaux sans pénombre. Au contraire, la déchirure de la première enveloppe grisâtre vient-elle à se refermer avant celle de la photosphère, alors on ne peut plus apercevoir le corps obscur, ce qui permet d'expliquer aisément les pénombres dépourvues de noyau. Lorsqu'une déchirure violente et subite se produit dans une masse gazeuse comme la photosphère, il doit y avoir tout autour de l'ouverture une condensation de la matière dont elle est formée et dès lors une plus grande intensité lumineuse. Telle serait l'origine des facules qui entourent presque toujours les taches.

Cette théorie de la constitution physique du Soleil rend compte, d'une façon assez satisfaisante, de la plupart des détails des phénomènes observés. La variation de forme des taches, leur disparition, leur mobilité même y trouvent une explication très-naturelle. Le fait, souvent constaté, que le noyau diminue peu à peu, pour s'évanouir comme un point en laissant subsister la pénombre quelque temps encore après sa disparition, se comprend à merveille : c'est bien ainsi que peu à peu doivent se resserrer, pour se rapprocher tout à fait, les talus mobiles des deux atmosphères, à mesure que la cause

qui leur avait donné naissance diminue d'énergie et disparaît. On conçoit aussi qu'après la disparition d'une tache, les facules doivent subsister encore et même se montrer plus intenses, puisqu'un certain temps doit être nécessaire pour rétablir l'homogénéité parfaite des couches gazeuses, et que les matières gazeuses, en se précipitant dans le vide formé primitivement par le noyau et la pénombre, s'y condensent naturellement et deviennent ainsi plus lumineuses. Mais l'hypothèse

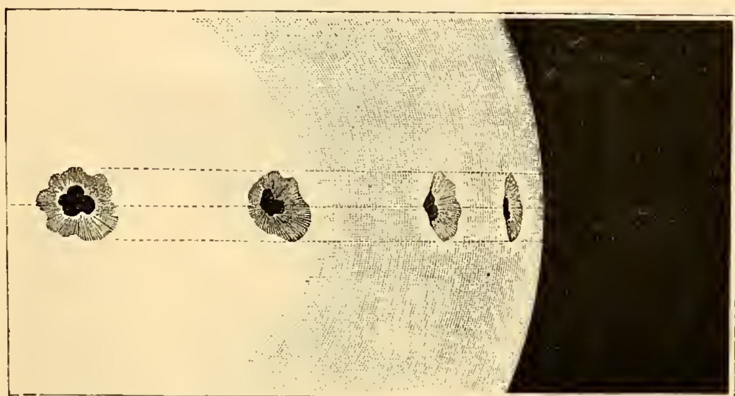


Fig. 61. Changement apparent dans la forme d'une tache solaire du bord au centre ou du centre au bord du Soleil.

ne rend pas compte de l'existence des facules qui précèdent l'apparition des taches.

Enfin outre les courants ascendants dont la rapidité est assez puissante pour trouer les enveloppes atmosphériques du Soleil, on conçoit qu'il existe une agitation continuelle dans les couches gazeuses et à la surface de la photosphère. Cette surface n'est donc point polie, mais sillonnée de rugosités, d'élévations et de dépressions dans tous les sens, analogues aux vagues de l'Océan. De là les rides lumineuses, qui constituent les lucules; de là les rides sombres et cette multitude de pores qui donnent au Soleil l'aspect pointillé dont il a été question plus haut.

La théorie de Wilson, dans son ensemble, est cependant aujourd'hui à peu près abandonnée. Le point faible est aisé à mettre en évidence. L'existence d'un noyau obscur et froid, enveloppé d'une couche d'une température évidemment énorme, est en contradiction avec tout ce que la physique nous apprend sur le rayonnement de la chaleur et sa conductibilité. De plus, il est incompréhensible qu'une aussi mince source de chaleur et de lumière rayonne pendant des siècles sans diminuer d'intensité.

Ce qui reste de cette théorie, c'est l'explication de l'appa-

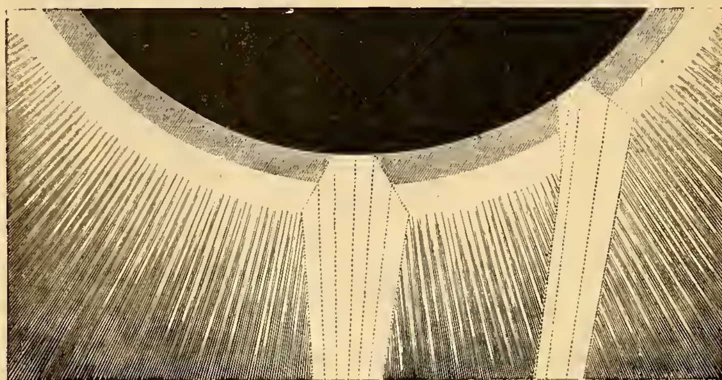


Fig. 62. Explication du changement de forme que présentent le noyau et la pénombre d'une tache dans l'hypothèse de Wilson.

rence que présentent un grand nombre de taches dans leurs mouvements du bord au centre et du centre au bord. Un coup d'œil jeté sur les figures 61 et 62 suffira pour faire comprendre comment la forme d'une tache, de son noyau et de sa pénombre, doit varier si, au lieu d'être un objet en saillie au-dessus de la photosphère, ou simplement de niveau avec elle, c'est en réalité une ouverture, une dépression dans cette enveloppe, le noyau noir représentant le fond de l'ouverture, la pénombre en formant comme les talus. En ce cas, dans le mouvement d'une tache au bord, par exemple, c'est la partie de la pénombre tournée vers le centre qui doit diminuer de

largeur la première, par le seul effet de la perspective; elle doit même finir par disparaître complétement, tandis que l'autre partie se montre à l'œil sous des incidences moins obliques, à mesure que le mouvement s'avance, et semble augmenter de dimensions. Plus près du bord, il arrivera un moment où le noyau, qui est le fond de la cavité, disparaîtra à l'œil; puis la pénombre elle-même, s'effilant de plus en plus, deviendra invisible avant d'avoir atteint le bord du Soleil.

Depuis Wilson, qui a fait valoir ces raisons en faveur de l'hypothèse des taches-cavités, on a apporté de nouveaux arguments. On a cité une observation de Galilée, bien des fois répétée depuis. Deux taches voisines sont vues au centre du disque, séparées seulement par un intervalle lumineux étroit. Si la tache la plus voisine du centre était en saillie, ce filet lumineux serait bientôt masqué par elle, tandis qu'il subsiste jusqu'aux bords, ne diminuant de largeur que dans la proportion voulue par la perspective. « Si les taches étaient des saillies, nous écrivait Chacornac en 1865, jamais une tache ne devrait disparaître avant d'être arrivée aux bords du disque, ce qui est cependant le cas général de l'observation. »

M. Warren de la Rue a pris, en 1868, deux vues photographiques d'une même tache, à deux jours de distance, de façon à obtenir l'angle visuel nécessaire à la vision en relief ou stéréoscopique. Or, l'examen au stéréoscope indique, « sans aucun doute possible, l'existence d'un creux dans la photosphère à l'endroit où se trouvait la tache. »

Enfin, en étudiant un grand nombre de taches, et en mesurant la largeur de leurs pénombres à droite et à gauche de la ligne représentant sur le disque l'axe solaire, les astronomes de Kew ont obtenu un résultat tout en faveur de l'hypothèse en question. Sur 605 cas différents, 75 n'ont fourni aucune indication, c'est-à-dire que les pénombres des taches étaient également étendues du côté du centre et du côté du bord; sur les 530 restants, 456 ou 86,04 pour cent étaient

favorables à l'hypothèse de Wilson, leurs pénombres étant plus larges du côté du bord le plus voisin du Soleil que du côté du centre; 74 ou 23,96 pour cent seulement présentaient l'apparence contraire. En mesurant de même la largeur des pénombres, dans le sens de l'axe, pour des taches situées de part et d'autre de l'équateur, les auteurs des recherches que nous venons de citer ont trouvé que l'effet de raccourcissement ou de perspective était celui qu'exige l'hypothèse de Wilson : 81 taches sur 100 avaient leurs pénombres plus larges vers les pôles que du côté du centre.

Malgré tous ces témoignages, il est encore aujourd'hui des astronomes qui ne regardent pas ces preuves comme décisives, et nous devons dire, sans rapporter leurs objections parce que cela nous entraînerait trop loin, que ces objections ne sont pas sans valeur.

§ 3. HYPOTHÈSE DE KIRCHHOFF.

Lorsque le célèbre physicien allemand eut jeté, vers 1860, les bases de l'analyse chimique solaire, les remarquables découvertes sur lesquelles cette analyse était fondée, le conduisirent à proposer une nouvelle théorie de la constitution physique du Soleil, et à une explication particulière des phénomènes des taches. Bien que cette théorie soit aujourd'hui généralement abandonnée, elle mérite d'être exposée sommairement ici, non-seulement à cause de l'autorité de son auteur, mais aussi parce qu'elle a provoqué dans le monde savant des discussions importantes.

Voici en quoi consiste la théorie du Soleil de Kirchhoff :

« La partie visible du Soleil, celle qui est limitée par les contours du disque et dont la surface forme la photosphère, serait une sphère solide ou liquide, incandescente ; une telle source lumineuse donne, comme on sait, un spectre continu.

« Ce noyau, dont la température est très-élevée, serait entouré d'une atmosphère très-dense, formée des éléments constitutifs du globe incandescent, que l'intensité de la température maintient à l'état de vapeurs. C'est l'atmosphère gazeuse absorbante dont l'interposition au devant du noyau produit les raies obscures du spectre solaire. »

Si telle est la constitution du globe solaire, les taches ne peuvent être que des accidents extérieurs à la photosphère, en saillie au-dessus de sa surface. Comment les explique-t-on dans la théorie nouvelle? Le voici :

M. Kirchhoff admet que, sous l'action de causes inconnues, des refroidissements partiels peuvent se produire en divers points de l'atmosphère du Soleil. Qu'arrivera-t-il alors? Qu'il se formera, en ces points, des précipitations analogues aux nuages de vapeur d'eau de l'atmosphère terrestre. Des agglomérations très-denses de vapeurs à l'état vésiculaire, des nuages sombres, interceptant les rayons lumineux du corps du Soleil, nous paraîtront comme des taches sur son disque. Un nuage, une fois formé, devient un écran pour les régions supérieures; de là un refroidissement dans ces régions, et la formation nouvelle d'une couche nuageuse plus légère, moins opaque et qui, de la Terre, aura l'apparence des pénombres qui environnent les taches. Dans cette hypothèse, les déformations apparentes subies par une tache qui se meut du bord au centre ou réciproquement, s'expliquent aussi par un effet de perspective dont la figure 63 donnera l'intelligence. Vue au centre ou de face, la tache semblera occuper le milieu de la pénombre; mais en s'éloignant vers le bord, la partie du nuage supérieur située du côté du centre se projettera sur le noyau sombre, et se confondra avec lui, tandis que la portion du même nuage, située du côté du bord, s'élargira en laissant voir, dans son épaisseur, la couche nuageuse qui domine la nuée noire.

Telle est la théorie allemande, en contradiction complète

avec la première, celle de Wilson, d'Herschel et d'Arago. La première exige que les taches soient des ouvertures de la photosphère, tandis que M. Kirchhoff, reprenant la première hypothèse de Galilée, en fait des nuages suspendus dans l'atmosphère du Soleil; d'autre part, l'analyse polariscopique enseigne, d'après Arago, que la photosphère est un gaz incandescent, tandis que l'analyse spectrale des physiciens allemands prouverait qu'elle ne peut être qu'un solide ou un liquide également à l'état d'incandescence. Il y a là une oppo-

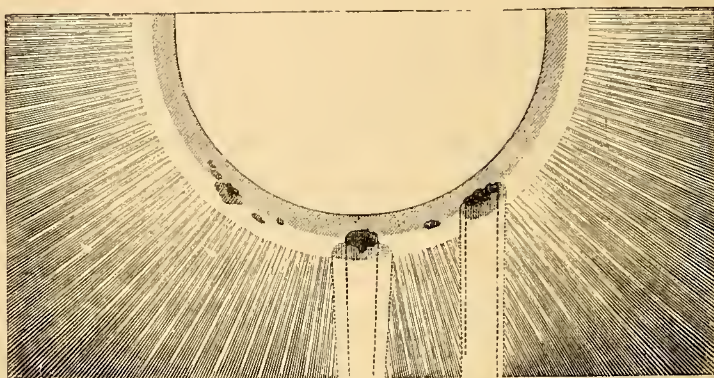


Fig. 63. Explication de l'apparence des taches, dans la théorie de Kirchhoff.

sition qui a remis en question, de la façon la plus absolue, tout ce qui concerne la constitution physique du Soleil.

La théorie de Kirchhoff ne rend compte d'une façon satisfaisante que des raies obscures du spectre solaire. L'hypothèse de nuages suspendus au-dessus de la photosphère pour expliquer les taches et leurs pénombres, s'est trouvée en contradiction avec certains faits parfaitement constatés, tels que la disparition presque constante des taches un peu avant leur arrivée sur le limbe.

Pour expliquer leurs mouvements propres, les partisans de la théorie ont dû admettre l'existence dans l'atmosphère solaire de courants analogues aux vents alizés terrestres. Cette

idée, émise en premier lieu par sir J. Herschel, a été reprise et développée par le docteur Spörer, qui considère les régions des taches comme balayées par des tempêtes dirigées dans le sens des parallèles (*Ost-Sturm* et *West-Sturm*), tandis que les régions polaires sont des zones de calme et que les zones voisines de l'équateur sont le siége de courants indifférents.

Les facules, dans la même théorie, sont simplement des points de la surface liquide d'une température plus élevée et d'un rayonnement plus intense que les parties voisines. On n'explique pas pourquoi elles accompagnent presque toujours les taches. Enfin, les protubérances sont des nuages lumineux de l'atmosphère du Soleil.

La théorie du docteur Zöllner se rattache à celle de Kirchhoff, puisqu'elle suppose un noyau liquide incandescent. Mais ce noyau n'a pas pour surface la photosphère, assemblage de nuages lumineux plus élevés que le noyau solaire. Le niveau de la couche liquide n'est autre que celui du noyau des taches, lesquelles sont alors des dépressions, des cavités, au lieu d'être des nuages plus élevés. Ce savant qui, nous l'avons vu plus haut, admet des températures de 27 000° pour la base inférieure de la photosphère, de 85 000° au moins pour l'intérieur du Soleil, explique la liquidité du noyau solaire par les énormes pressions de 184 000 atmosphères et de 4 070 000 atmosphères que supportent, selon lui, la couche inférieure de la photosphère d'une part, et, de l'autre, les couches internes de l'astre.

Mais si le noyau du Soleil est liquide, comment expliquer la faible densité (1,53) d'un corps que les observations spectroscopiques montrent si abondamment formé de substances métalliques?

§ 4. AUTRES HYPOTHÈSES CONTEMPORAINES.

L'ancienne théorie de Galilée, qui faisait de la photosphère un océan de matière fluide, et des taches, des scories de la surface lumineuse, nuages, écume ou fumée, ou encore celle de La Hire considérant les taches comme des corps solides flottant sur cette mer incandescente, a reparu de nos jours avec les additions et modifications que comportent les faits nouveaux rassemblés depuis près de trois siècles.

M. E. Gautier (de Genève) prend pour point de départ la liquidité de la masse du globe solaire et l'existence d'une atmosphère extérieure, base de la théorie de Kirchhoff. Mais il repousse l'explication des taches données par ce dernier. Il les attribuait d'abord à des solidifications partielles de la surface liquide, et les comparait aux scories qu'on observe sur les métaux en fusion. L'opacité, la forme nettement accusée, les contours à la fois tourmentés et brusques, la persistance qu'offrent les scories sur les bains liquides qui leur donnent naissance, étaient des caractères convenant mieux, selon lui, aux apparences des taches, que des nuages ou des vapeurs. Les ponts ou filets lumineux étaient des fissures des scories, laissant voir au-dessous la masse en fusion et incandescente. Il ne lui semblait pas prouvé que les taches fussent des cavités, des dépressions de la photosphère.

Mais ce savant a modifié en partie cette manière de voir, retiré les termes de solidification, de croûtes solides, appliqués aux taches ; toutefois il considère toujours celles-ci comme des amas de matières obscurcissantes, pouvant se trouver sur ou dans la photosphère. Quant à la photosphère, ce n'est plus à proprement parler la surface même du globe liquide, mais cette surface surmontée d'une mince couche de gaz, couche brillante, accidentée, irrégulière, d'épaisseur variable. Les matières dont les taches sont formées font obstacle tout au-

tour à la tension des gaz sous-jacents, et c'est l'action de ceux-ci qui produit dans la photosphère les bourrelets ou surélévations de la matière photosphérique, qui se manifestent sous la forme de facules.

Les inégalités du mouvement des taches sont attribuées par M. E. Gautier aux frottements des couches gazeuzes, rangées par ordre de densité, avec la surface du globe liquide. Cette hypothèse lui semble concorder avec les lois de variation de la rotation solaire, selon la latitude des taches observées. Elle explique les faits que le docteur Spörer liait à l'existence de courants parallèles à l'équateur, courants dont la cause est difficile à concevoir à la surface du Soleil.

Nous avons encore à mentionner une théorie de la constitution physique du Soleil, se rattachant à l'hypothèse de La Hire, théorie élaborée par un de nos compatriotes, M. le colonel Gazan (d'Antibes). Ce savant considère le Soleil « comme une grosse Terre en voie de se refroidir et de s'éteindre, comme elle, en passant par les mêmes phases. Ce ne sera qu'après un temps très-considérable, probablement qu'après des millions d'années, qu'il cessera d'éclairer et de vivifier les corps qui sont sous sa dépendance, tant sa masse est énorme et sa température élevée. Mais déjà une croûte analogue à celle que nous habitons sur la Terre, et qui contient les matières en fusion du noyau ou corps du Soleil, a acquis une certaine épaisseur. Elle est surmontée d'une couche pâteuse à la surface de contact, liquide et lumineuse à sa partie supérieure, et sur laquelle repose une atmosphère immense dont la densité va en décroissant jusqu'à sa limite ». M. Gazan donne à cette couche pâteuse le nom de *pastosphère*. En résumé, selon lui, trois parties principales composent le Soleil : « 1° un corps ou noyau obscur, formé de matières en fusion contenues dans une croûte solide ; 2° une pastosphère, ou couche en partie pâteuse et en partie liquide et lumineuse ; 3° une atmosphère

de vapeurs minérales, de gaz et de vapeurs d'eau. Quant aux taches, M. Gazan les explique ainsi : les efforts expansifs des matières intérieures, joints à la force centrifuge détachent des morceaux de la croûte du noyau et les lancent à travers la pastosphère. Le fragment solide refoule à l'extérieur la matière de la pastosphère ; de là les mouvements tumultueux, les torrents divergents qui forment les facules. Puis se montre un point noir, un pore ; c'est le morceau de croûte formant sa première apparition ; il s'agrandit et finit par surnager quand toute la matière brillante s'est écoulée. Jusque-là, il n'y a pas de pénombre. Un mouvement inverse ou de descente, sous l'action de la pesanteur et de la densité du fragment, s'opère alors. Il se fait un vide, dans lequel va se précipiter la matière liquide et pâteuse : c'est seulement alors que la tache est une cavité et a une pénombre. L'auteur de cette théorie rend compte ainsi de toutes les apparences que présentent les taches, dans leurs transformations successives. Mais il n'aborde ni la question de la loi de la rotation selon la latitude, ni celle de la périodicité des taches, que la plupart des théories ont d'ailleurs laissée de côté jusqu'ici.

§ 5. THÉORIE DE LA CONSTITUTION PHYSIQUE DU SOLEIL, DE M. FAYE.

Un astronome français, M. Faye, après une critique approfondie des hypothèses anciennes et modernes, et une étude suivie des faits nouveaux révélés par le télescope et l'analyse spectrale, a proposé une théorie que nous allons essayer de résumer dans ses traits essentiels[1].

1. Nous suivons, pour cette analyse, les deux dernières notices publiées par M. Faye dans les années 1873 et 1874 de l'*Annuaire du Bureau des longitudes*. Le savant académicien a modifié considérablement, sur divers points, ses premières vues exposées en 1865. Il a soutenu depuis contre ses divers contradicteurs une polémique fort longue, dont les phases peuvent

« Le Soleil, dit M. Faye lui-même, est un globe dont la densité moyenne est un peu supérieure à celle de l'eau, mais dont les couches extrêmes sont évidemment gazeuses. La surface de ce globe offre, sur un fond relativement obscur, d'innombrables amas de particules incandescentes solides ou liquides, formant des nuages isolés, très-petits, d'un éclat excessif, à peu près de même structure et de même grandeur. Voilà pour la photosphère. Ce globe parfaitement sphérique tourne autour d'un axe invariable, d'un mouvement de rotation bien différent du nôtre et de celui des planètes de notre système. A sa surface apparaissent de temps en temps des taches noires qui semblent, au premier coup d'œil, être de simples lacunes dans ce réseau de nuages incandescents ! »

M. Faye laisse un instant les taches pour s'attacher à rendre compte d'un fait capital, que toute théorie du Soleil doit expliquer avant tout, sous peine de pécher par la base, d'être incomplète et défectueuse : le fait de l'énergie actuelle de la radiation, et de sa presque invariabilité ou de sa constance depuis des milliers de siècles. Pour lui « l'énergie et la constance de la radiation du Soleil sont liées aux grains de riz de la photosphère. Or ces nuages incandescents ne peuvent pas toujours durer, toujours émettre avec cette intensité formidable de la lumière et de la chaleur. Il faut qu'ils se renouvellent sans cesse. »

De là l'hypothèse d'une masse gazeuse interne, maintenue en cet état par une température excessive, en général supérieure à celle de la dissociation pour les éléments chimiques qui la composent. Mais les couches extrêmes, par leur rayonnement, se refroidissent, leur température s'abaisse jusqu'au point où les vapeurs métalliques peuvent se combiner avec

être suivies dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, jusqu'à l'époque actuelle, et qu'il serait très-difficile d'analyser dans un aussi court chapitre. Il nous a paru plus sûr de nous en tenir au résumé que M. Faye a fait lui-même dans le recueil périodique cité.

l'oxygène ambiant. « A ce moment, on verra apparaître subitement à la surface de l'astre des nuages de poussières incandescentes d'un éclat incomparablement supérieur à la radiation précédente : la photosphère se sera formée spontanément par suite de l'abaissement superficiel de la température. Mais ces particules solides, beaucoup plus lourdes que la couche gazeuse, commenceront à tomber vers le centre de l'astre. Elles en traverseront les couches successives en regagnant peu à peu, dans ce trajet, la grande quantité de chaleur qu'elles avaient rayonnée tout à l'heure, quand elles étaient suspendues dans la photosphère. »

Parvenues à une couche inférieure de température suffisante pour dissocier de nouveau ces matières, et les réduire en vapeur, elles donneront lieu à un développement gazeux, qui ne pourra s'effectuer sans troubler l'équilibre des couches profondes. Alors naîtront par réaction aux courants descendants, des courants ascendants portant à l'extérieur des aliments nouveaux pour l'incandescence photosphérique.

Ces mouvements incessants, ces pluies de molécules solides vers le centre, leur dissociation, ces courants ascendants gazeux et leurs condensations successives, permettent à la masse entière gazeuse du Soleil de participer à la radiation extérieure ; et, comme cette masse est énorme, on peut se rendre compte ainsi de l'entretien de l'énergie pendant un nombre incalculable de siècles.

Il est moins aisé peut-être de se rendre compte de la loi de rotation du Soleil, loi qui fait décroître la vitesse du mouvement angulaire proportionnellement au carré du sinus de la latitude (formule de M. Faye). Ce savant admet que la couche profonde à laquelle arrivent les courants descendants et d'où partent les courants ascensionnels, n'est pas rigoureusement sphérique, mais elliptique ou aplatie aux pôles[1]. S'il en est

1. Si nous avons bien compris, cet aplatissement serait dû à l'excès de

ainsi, les courants ascendants ont à faire un chemin moindre à l'équateur qu'aux pôles; d'où une rotation d'autant plus rapide que le point considéré est plus près de l'équateur, et « la différence en un point quelconque serait à peu près, selon M. Faye, proportionnelle au carré du sinus de la latitude. »

Quant à l'origine de la chaleur solaire, M. Faye adopte l'hypothèse de la nébulosité primitive de tous les matériaux du système solaire et de leur concentration progressive par l'action prépondérante d'un noyau qui est devenu le Soleil. En tombant vers ce centre avec une vitesse croissante, ces matériaux ont vu leur force vive annulée par le choc ou mieux transformée en chaleur : c'est l'hypothèse d'Helmholtz exposée plus haut. Aujourd'hui encore, par sa radiation incessante, le Soleil se refroidit et se contracte; « ses matériaux se rapprochent du centre, et cette chute continuelle, si faible qu'elle paraisse, donne lieu à une nouvelle transformation de travail en calories très-considérable et peut-être même capable de subvenir en grande partie à la dépense actuelle; mais ces calculs ne sauraient être faits avec quelque rigueur, faute de connaître la loi des densités à l'intérieur du Soleil, et celle de la contraction. »

Contraction progressive et radiation extérieure sont deux termes liés l'un à l'autre. Il serait possible, selon M. Faye, qu'à partir d'une certaine époque, cette double action donnât lieu à quelque intermittence. Par exemple, en approchant de l'extinction finale, la contraction pourrait procéder par saccades; un affaiblissement brusque de la masse donnerait lieu à un dégagement presque subit de chaleur. Alors l'astre semblera se

vitesse de rotation que possèdent ces couches sur celle des couches extérieures, par suite de l'action différente des courants opposés : les courants descendants amenant au centre des molécules douées d'une plus grande vitesse linéaire, tendent à accélérer la rotation interne; les courants ascendants à ralentir au contraire la rotation externe.

ranimer tout à coup; mais, après avoir de nouveau rayonné quelques mois ou quelques jours avec une énergie nouvelle, son éclat faiblira pour longtemps, sinon pour toujours. Avant d'arriver à ces oscillations extrêmes, les phénomènes beaucoup moins altérés pourront présenter un caractère de périodicité régulière, et telle est, sans doute, la raison du fait découvert par M. Schwabe et mis en pleine lumière par M. R. Wolf (de Zurich).

Dans la théorie de M. Faye, que sont les taches, les noyaux et les pénombres, que sont les facules? Quelle est l'origine ou la cause de ces accidents, si constants dans leur périodicité, de la photosphère?

Sur ce point important, il se range à la théorie de Wilson, du moins en ce sens que les taches ne sont, pour lui, ni extérieures à la photosphère, ni simplement superficielles. Ce sont des cavités, ouvertures ou dépressions de la couche lumineuse. Outre les arguments fournis par Wilson et ses successeurs, ainsi que par les observateurs contemporains, M. Faye a cherché une preuve de cette structure des taches dans un effet particulier de perspective auquel il donne le nom de parallaxe de profondeur. Laissons-le définir cet effet qui affecte le mouvement de rotation des taches.

« Si les taches, dit-il, sont fixées à la surface, leurs mouvements, rapportés par le calcul au centre du Soleil, nous paraîtront uniformes dans toute l'étendue du disque solaire, que la tache soit vue au centre ou près de l'un et l'autre bord; mais il n'en sera plus de même si elles sont au-dessus ou au-dessous de la surface, au-dessus comme des nuages, au-dessous comme des cavités. Dans le premier cas, elles paraîtront, partout ailleurs qu'au centre, un peu plus proches des bords qu'il ne convient; dans le second, elles en seront un peu plus éloignées. Cet effet va croissant, à mesure que la tache se rapproche des bords du disque solaire; il est sensiblement propor-

tionnel à la tangente de l'arc qui mesure la distance de la tache au centre. On voit que la difficulté est ainsi ramenée à une question de calcul. » Or le calcul, selon M. Faye, donne raison à l'hypothèse qui place le noyau des taches au-dessous de la photosphère. La profondeur moyenne qui en résulte est un peu plus grande que la moitié du rayon de la Terre (0,57), ou un peu plus de 900 lieues.

Il est vrai que si le Soleil a une atmosphère extérieure réfringente, l'action de la réfraction produirait les mêmes inégalités apparentes que la parallaxe de profondeur. Mais l'accord des calculs de M. Faye avec les preuves invoquées par le procédé de mesure de Wilson lui paraît suffisant pour trancher la question dans le sens d'une réfraction nulle ou insensible. Il n'y a donc pas d'atmosphère réfringente, et les taches sont des cavités de la photosphère. Reste alors la difficulté d'expliquer les raies obscures du spectre solaire. M. Faye s'en tire, en faisant remarquer qu'il suffit d'une mince épaisseur de vapeurs métalliques enveloppant la partie lumineuse de la photosphère, pour exercer l'absorption élective dont il s'agit; or il n'est nullement nécessaire pour cela que cette faible épaisseur soit disposée en couches régulièrement réfringentes. La chromosphère n'est point une atmosphère formée de couches de niveau, mais un assemblage confus de protubérances ou de flammes s'élevant en tous sens avec une incroyable vitesse, et prenant des formes si capricieuses qu'elles défient toute comparaison.

Enfin, d'où viennent les taches? Quelle en est l'origine, la cause physique?

Dans une première hypothèse, M. Faye en attribuait la formation aux courants ascendants, venant trouer la photosphère, ce qui les faisait fort ressembler aux éruptions qu'admettent d'autres astronomes. Mais aujourd'hui, il rattache directement la production des taches à la loi de rotation des couches photosphériques et à l'inégalité de vitesse que pos-

sèdent ces couches, à mesure que, dans chaque hémisphère, elles s'éloignent de part et d'autre de l'équateur. De cette différence de vitesse des couches contiguës résultent « des tourbillons verticaux tout à fait analogues à ceux qui se produisent si aisément dans les cours d'eau, partout où une cause quelconque diminue ou augmente la vitesse des tran-

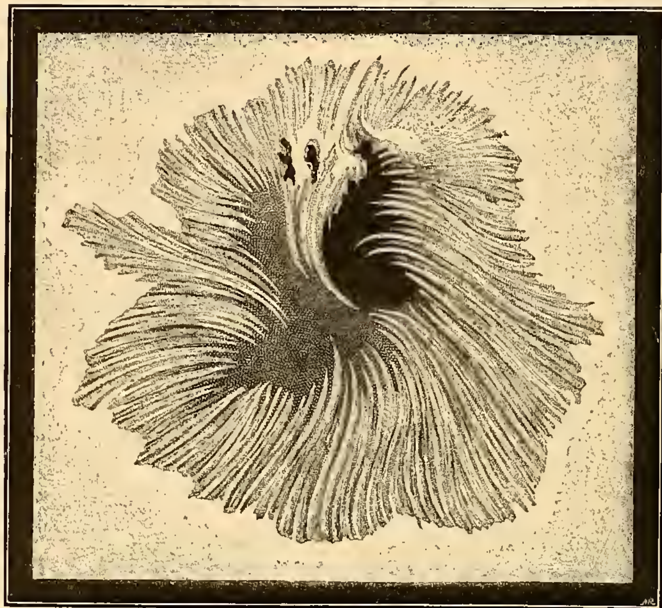


Fig. 64. Tache solaire observée le 25 juin 1872, par Tacchini.

ches parallèles au sens du mouvement[1] ». Les taches solaires sont assimilées encore par M. Faye aux cyclones terrestres, les uns passagers, les autres durant jusqu'à six ou huit jours.

1. Nous avons donné déjà des exemples de taches dont les stries des pénombres accusent des mouvements tourbillonnaires Les figures 64 et 65 indiquent aussi des mouvements de ce genre. Mais il est loin d'en être ainsi de toutes les taches. Il est du reste assez difficile d'expliquer, dans la théorie de M. Faye, les directions opposées que paraissent prendre les stries à l'intérieur d'une même tache, et cela lui a été opposé comme une objection. N'est-il pas vraisemblable que toutes les taches n'ont pas même origine, ou si l'on veut, que des causes multiples concourent à la production du phénomène?

Mais comment ces tourbillons produisent-ils noyaux, pénombres, facules? Le voici :

« Les tourbillons de la photosphère absorbent les nuages lumineux de la surface brillante, et comme ils exercent aussi, dans le sens de leur axe, une sorte d'aspiration sur les régions froides placées au-dessus, ils entraînent dans leur entonnoir évasé circulairement les matériaux refroidis de la chromosphère; de là un abaissement de température bien capable de donner l'opacité requise au noyau obscur du tourbillon. »

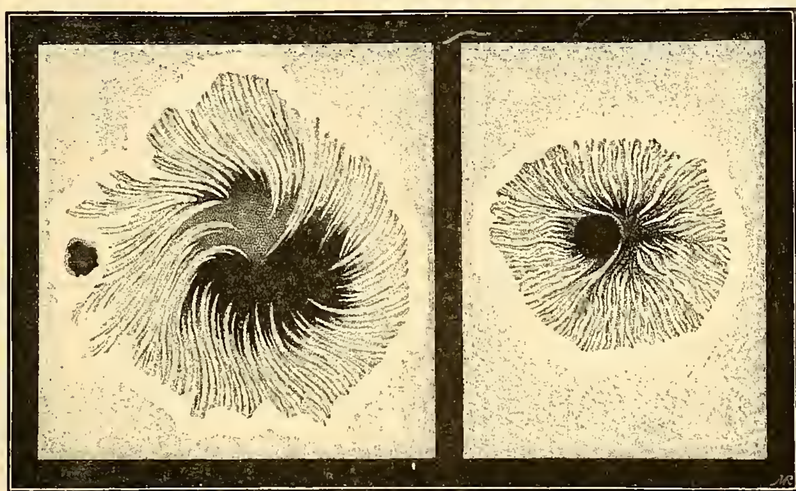


Fig. 65. Taches solaires en forme de tourbillon, d'après Tacchini.

La condensation des granulations lumineuses de la photosphère écartées par le tourbillon, produit les facules autour de l'orifice supérieur de la tache. Les pénombres viennent d'autres granulations lumineuses amenées par les courants ascendants, qui, « saisis par l'abaissement anormal de température qui se produit le long des parois de l'entonnoir, y déposent en longs filaments les produits de leur condensation anticipée ». Enfin les trous les plus noirs des noyaux indiquent une pénétration plus profonde de la pointe du cône tourbillonnant.

La rareté des taches à l'équateur s'explique par le peu de différence de vitesse d'une zone à l'autre dans cette région. Mais pourquoi manquent-elles absolument dans les régions polaires, où, au contraire, cette différence de vitesse est croissante? C'est ce que M. Faye n'explique pas. Quant aux protubérances, elles seraient produites de cette façon : les masses gazeuses aspirées par les tourbillons dans la chromosphère, et entraînées jusqu'à une certaine profondeur, ne tardent pas à s'échapper par l'orifice inférieur, puis à remonter à la surface, surgissant au-dessus de la photosphère en langues de feu plus ou moins élancées. Cette explication, qui subordonne les protubérances aux taches, ne rend pas compte de celles qu'on aperçoit en dehors de la zone des taches et jusque près des pôles.

Telle est la théorie remarquable, quoique à quelques égards insuffisante, à laquelle notre savant compatriote s'est arrêté. De toutes les hypothèses proposées pour expliquer les phénomènes solaires, elle est à coup sûr la plus complète, la mieux liée, celle qui embrasse le plus grand nombre de lois et de faits. Les discussions qu'elle a provoquées, les objections auxquelles elle a donné lieu et qui sont loin d'être toutes levées, à notre avis, laissent dans le doute des points très-importants de la constitution physique du Soleil. C'est à l'avenir de lever ces doutes, de porter la lumière sur les points obscurs, d'édifier enfin la théorie véritable, capable de répondre à la question posée au début de ce chapitre : « Qu'est-ce que le Soleil ? » laquelle, on le verra plus loin, permettra de résoudre la question beaucoup plus générale : « Qu'est-ce qu'une étoile ? »

§ 6. RÉSUMÉ DES CONNAISSANCES ACTUELLES SUR LA CONSTITUTION PHYSIQUE DU SOLEIL.

Nous avons donné, dans cette description des phénomènes solaires, la première place aux faits, mais nous ne pouvions terminer sans exposer, sommairement du moins, les principales théories mises en avant pour les interpréter : c'est la part qui revient légitimement à l'hypothèse, sans laquelle aucune science ne pourrait se constituer. Mais il faut se garder de considérer aucune de ces théories, répétons-le, comme absolument confirmée. Du reste, le seul fait de leur opposition, du partage d'opinion qu'on trouve à cet égard chez les astronomes les plus autorisés, suffit pour montrer que la science n'est pas encore faite sous ce rapport. Toutefois, peut-être est-il possible, avec toute la réserve commandée en un sujet délicat et difficile, de résumer les points admis, les faits qui, dans l'état actuel de la science, paraissent hors de contestation, et de signaler en même temps les points douteux. Selon nous, voici comment on pourrait formuler les uns et les autres de ces points :

I. La photosphère, ou enveloppe lumineuse d'épaisseur inconnue qui limite le globe solaire, est constituée par des masses nuageuses incandescentes. Les particules matérielles dont ces nuages sont formés, ou qui les rendent lumineux, sont-elles solides ou liquides, sont-elles gazeuses sous certaines pressions considérables? c'est une question qui reste douteuse.

Le spectre de leur lumière est continu.

Le fond, plus sombre, constituant les rides ou les pores de la photosphère, est-il gazeux ou liquide?

II. Les taches solaires sont des dépressions de la masse photosphérique, la pénombre formant les talus de ces espèces

de cavités, et le noyau noir en étant le fond. L'accumulation des éléments lumineux de la photosphère sur les bords extérieurs des taches forme des bourrelets saillants, plus éclatants que le reste du disque : ce sont les facules. De pareilles saillies se voient quelquefois isolément, sans montrer de taches.

III. La photosphère est entourée d'une mince couche absorbante formée par les vapeurs des éléments chimiques de la masse incandescente. Le spectre de cette couche est formé des lignes brillantes constituant les spectres propres à tous ces éléments, mais il n'est directement visible que dans les cas où la couche peut être vue isolée de la photosphère (pendant les éclipses totales). C'est l'absorption élective de cette couche qui produit les raies obscures du spectre solaire.

IV. Les taches sont des régions qui, sous l'influence d'un trouble quelconque, éruptions, tourbillons, refroidissements, deviennent temporairement le siége d'une absorption plus intense, proportionnelle sans doute à l'épaisseur des matières absorbantes qui les ont envahies. Mais il est possible qu'au-dessous de ces couches subsiste toujours la matière photosphérique lumineuse : en ce cas, la cavité de la tache serait une simple dépression de la photosphère. D'autres pensent qu'il y a, dans les noyaux, une réelle trouée qui laisse voir le noyau interne.

V. La chromosphère est l'enveloppe gazeuse, en grande partie composée d'hydrogène incandescent, qui entoure la photosphère ; la couche mince la plus basse de cette enveloppe, formée des vapeurs des éléments chimiques du Soleil, n'est autre que la couche absorbante mentionnée plus haut.

Les protubérances sont des expansions, des soulèvements de la photosphère, qui transportent parfois à de grandes hauteurs quelques-unes des vapeurs métalliques des couches chromosphériques les plus basses. Parfois, les protubérances semblent n'être pas le produit d'éruptions, mais de simples effets électriques ou magnétiques.

VI. La couronne est une atmosphère hydrogénée du Soleil; mais elle n'a point les caractères d'une atmosphère à couche de niveau, en équilibre, comme l'atmosphère terrestre; c'est comme le résidu des matières les plus légères lancées par les protubérances.

VII. Les astronomes contemporains ne s'accordent point au sujet de la cause productrice des taches. Les uns la cherchent à l'extérieur du globe solaire, soit dans l'action des masses planétaires produisant des sortes de marées dans les couches fluides de l'astre, soit dans la chute des matières cosmiques. D'autres y voient des scories, solides, liquides ou même gazeuses, des morceaux d'une croûte interne. Pour d'autres savants enfin, les taches sont le produit des mouvements intestins qui, comme des éruptions volcaniques, déchirent la photosphère, ou de tourbillons dus à la différence de vitesse des couches concentriques de cette enveloppe.

VIII. Il y a une liaison entre les phénomènes des facules, des taches et des protubérances, bien que ces divers phénomènes ne soient pas tous concomitants. Ils sont certainement l'indice d'une activité propre au globe solaire, et suivent les uns et les autres une certaine périodicité, avec des intervalles réguliers de maxima et de minima. Enfin, il paraît établi qu'il y a un lien entre les manifestations de l'activité solaire et les variations du magnétisme terrestre.

Tels sont, croyons-nous, les résultats les plus immédiats des dernières découvertes, des plus récentes observations qui ont eu la physique solaire pour objet. Le doute subsiste sur beaucoup de points; mais il est une dernière question qu'on a agitée autrefois et même résolue affirmativement, au sujet de laquelle, dans l'état actuel des connaissances, il nous semble impossible que l'on conserve la moindre incertitude : c'est celle de savoir si le Soleil est habité, ou mieux, est habi-

table : évidemment une masse incandescente, dont la température atteint certainement quelques milliers de degrés, une masse à la surface de laquelle tous les métaux se réduisent à l'état de vapeur, est incompatible avec l'existence d'êtres organisés, d'être vivants. L'hypothèse du Soleil habité, ou même habitable, est un roman qu'il faut laisser aux imaginations amoureuses de l'impossible, mais que ne supporte plus aujourd'hui la sévérité de la science. En admettant un noyau froid, obscur, on pouvait s'exprimer comme le fit Arago, il y a vingt ans, et dire : « Si l'on me posait simplement cette question : Le Soleil est-il habité ? je répondrais que je n'en sais rien. Mais, qu'on me demande si le Soleil peut être habité par des êtres organisés d'une manière analogue à ceux qui peuplent notre globe, et je n'hésiterai pas à faire une réponse affirmative. » Mais depuis la mort de l'illustre secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, l'étude de la constitution du Soleil a fait des progrès tels, qu'il n'hésiterait plus aujourd'hui, nous le croyons du moins, à réformer son opinion. Cela n'ôte rien d'ailleurs à l'importance du Soleil, et si l'astre immense ne porte point lui-même la vie dans son sein, n'oublions pas que, par ses radiations puissantes, il est le grand générateur de la vie et du mouvement dans tous les astres du monde solaire.

Le Soleil en effet agit sur la Terre, sur chaque planète, par sa masse, soit qu'il la maintienne dans son orbite à des distances dont la variabilité est réglée par des lois inflexibles, soit qu'il combine son action avec celle de la Lune pour produire le mouvement oscillatoire semidiurne des eaux de l'Océan, les marées. La chaleur des rayons solaires est la cause principale des perturbations d'équilibre des couches atmosphériques. C'est elle qui donne naissance aux vents, aux courants aériens et pélagiques, à la vaporisation de l'eau des fleuves, des lacs, de la mer, et qui produit ainsi une circulation continue des fluides à la surface de la planète. Cette

action se trouve être ainsi le principe des modifications séculaires des couches géologiques, par la dégradation lente mais continue des roches, et par les transports de matières dus aux courants. C'est la chaleur et la lumière de l'astre central qui distribuent partout la vie aux êtres du monde végétal et du monde animal. « Tantôt, dit Humboldt (*Cosmos*, III, 428), son action se manifeste tranquillement et en silence par des affinités chimiques, et détermine les divers phénomènes de la vie, chez les végétaux, dans l'endosmose des parois cellulaires, chez les animaux, dans le tissu des fibres musculaires ou nerveuses; tantôt elle fait éclater dans l'atmosphère le tonnerre, les trombes d'eau, les ouragans.... Les ondes lumineuses n'agissent pas seulement sur le monde des corps, et ne se bornent pas à décomposer et à recomposer les substances; elles n'ont pas pour unique effet d'attirer hors du sein de la terre les germes délicats des plantes, de développer dans les feuilles la matière verte ou chlorophylle, de teindre les fleurs odorantes, ou de répéter mille et mille fois l'image du Soleil, au milieu du choc gracieux des vagues et sur les tiges légères de la prairie, courbées par le souffle du vent. La lumière du ciel, suivant les différents degrés de sa durée et de son éclat, est aussi en relation mystérieuse avec l'homme intérieur, avec l'excitation plus ou moins vive de ses facultés, avec la disposition gaie ou mélancolique de son humeur. C'est ce que Pline l'Ancien a exprimé par ces paroles : « Cœli tristitiam discutit sol, et humani nubila animi serenat[1]. »

1. Le Soleil chasse la tristesse du ciel, et dissipe les nuages qui obscurcissent le cœur humain.

LIVRE DEUXIÈME

LES PLANÈTES

§ 1. LES MOUVEMENTS DE TRANSLATION DES PLANÈTES.

Huit planètes principales et cent soixante petites planètes[1] se meuvent autour du Soleil, à des distances fort inégales, en des périodes de temps très-différentes, mais toutes avec une régularité constante et suivant des lois identiques pour les unes et les autres.

Avant d'aborder l'étude particulière, individuelle, de tous ces corps célestes, il est nécessaire d'être familiarisé avec un petit nombre de notions générales relatives à leurs mouvements, et aussi avec quelques données dont l'utilité se fera sentir quand nous nous occuperons de leur constitution physique.

Occupons-nous d'abord des mouvements de translation.

Chaque planète, on l'a déjà vu, se meut périodiquement autour du Soleil. Prenons la Terre pour exemple, et supposons que cette masse, si énorme qu'elle nous paraisse, soit réduite à un point : en d'autres termes, ne considérons que

1. Trois petites planètes viennent d'être découvertes depuis l'impression des premières livraisons du Ciel.

son centre, de gravité ou de figure. Ce point, en circulant autour du Soleil, décrit une ligne, une courbe idéale en un temps qui reste invariablement le même dans la suite indéfinie des siècles. Cette ligne courbe est ce qu'on nomme l'*orbite* de la Terre, et le temps périodique que met notre planète à revenir au même point se nomme une *année sidérale*. Chaque planète décrit son orbite particulière ; chacune d'elles accomplit un tour entier en un temps qui varie d'une planète à l'autre, mais qui reste invariable pour chacune d'elles : en un mot, la durée de la *révolution sidérale* est constante pour chaque planète. Mais, pourquoi ces expressions : année, révolution *sidérale ?* Le voici.

Supposez que, du centre du Soleil au centre de la Terre, on mène une ligne droite. Cette ligne, qui passe par un point donné de l'orbite, prolongée dans le ciel, irait rencontrer une étoile déterminée, un point particulier de la voûte céleste. C'est le point de repère, le point de départ de la révolution planétaire, et l'on considère cette révolution comme accomplie, quand le centre de la Terre est revenu à une position telle de son orbite, que la ligne menée du Soleil à ce centre soit identique à la première, ou aille percer le ciel au même point, à la même étoile[1].

Voilà donc, déjà, un premier caractère commun à toutes les orbites planétaires, à toutes les planètes du système : c'est que chacune de celles-ci accomplit sa *révolution* en un temps toujours le même, qui est son *année sidérale*. Il y en a d'autres, non moins importants.

D'abord, abstraction faite de certaines inégalités d'ailleurs périodiques, chacune des orbites planétaires est *plane*. En d'autres termes, le centre de chaque planète se trouve toujours

1. Il serait absolument équivalent de considérer le point diamétralement opposé où notre ligne droite va percer la voûte céleste. L'année, la révolution sidérale se dirait alors de l'intervalle compris entre deux retours consécutifs (apparents) du centre du Soleil au même point, à la même étoile.



E. Guillemin, del. Imp. Fraillery

LE MONDE PLANÉTAIRE

Orbites des planètes rabattues sur le plan de l'Ecliptique.

PLANÈTES MOYENNES : Mercure, Vénus, la Terre et Mars. — Zone des PETITES PLANÈTES.
GROSSES PLANÈTES : Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.

dans un même plan, et ce plan passe lui-même par le centre du Soleil. Mais les plans des 168 orbites planétaires ne coïncident pas entre eux; ils sont diversement inclinés les uns sur les autres, ou, ce qui revient au même, ils sont diversement inclinés sur l'un d'eux, le plan de l'orbite terrestre, ou *écliptique*, que l'on prend pour terme de comparaison.

Les orbites des planètes ont un troisième caractère commun, c'est la forme de la courbe décrite autour du Soleil. Cette forme est celle d'une *ellipse*, courbe ovale à deux foyers, symétrique par rapport au plus grand de ses diamètres, qui passe par les foyers, et qu'on nomme *grand axe* de l'orbite.

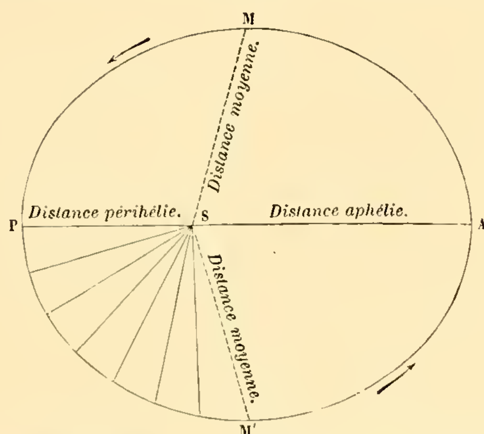


Fig. 66. Orbite elliptique des planètes. Périhélie, aphélie et distance moyenne.

Le Soleil, ou plutôt son centre, n'occupe pas le centre de l'ellipse, mais l'un des deux foyers. Il résulte évidemment de là, que la distance d'une planète au Soleil varie pendant tout le cours d'une révolution, que cette distance atteint son maximum et son minimum aux deux extrémités du grand axe, nommé aussi *ligne des apsides;* enfin, que de chaque côté de ce grand axe la planète occupe à des époques différentes des positions deux à deux symétriques, de manière à se trouver en ces points à des distances du Soleil égales aussi deux à deux.

Le *périhélie* est la position où la planète est à sa plus courte

distance du Soleil; l'*aphélie*, à l'autre sommet du grand axe, marque sa distance maximum. On dit que la planète est à sa moyenne distance, lorsque celle-ci est égale à la demi-somme des distances extrêmes, ou à la moitié du grand axe, circonstance qui se présente deux fois à chaque révolution, lorsque l'astre occupe les points de l'orbite situés précisément à l'une et à l'autre extrémités du petit axe de la courbe (fig. 66).

Quand on compare entre elles les orbites des planètes, abstraction faite de leurs positions relatives ou de l'inclinaison de leurs plans, il y a à distinguer deux choses, soit les dimensions des courbes décrites, soit leur forme. La forme dépend de l'élément qu'on appelle l'*excentricité :* on entend par là le rapport numérique entre la distance du foyer au centre et le demi-grand axe de la courbe. Plus l'excentricité est grande, plus la courbe est allongée, plus l'ellipse diffère du cercle qui est lui-même une ellipse dont les foyers et le centre se confondent. Plus au contraire l'excentricité est petite, plus l'orbite s'approche d'être circulaire. Or, ce qui caractérise toutes les ellipses planétaires sans exception, c'est la petitesse de leur excentricité : aussi est-il difficile, à l'inspection des courbes tracées rigoureusement, de les distinguer à première vue du cercle. Cependant, il y a entre les excentricités planétaires de notables différences. En ne considérant que les grandes planètes, l'orbite de Mercure est la plus excentrique de toutes; celle de Vénus est au contraire la plus rapprochée de la forme circulaire; celle de Mars, à peu près intermédiaire sous ce rapport, a encore une excentricité presque six fois égale à l'excentricité de l'orbite terrestre. Neptune se rapproche de Vénus; Saturne, Jupiter et Mars ont des excentricités plus que triples de celle de la Terre. Il est aisé de comprendre que plus l'excentricité d'une orbite planétaire est faible, plus les distances variables de la planète au Soleil approchent d'être égales dans le cours d'une révolution. Les distances périhélie et aphélie diffèrent d'autant plus l'une de l'autre que l'orbite est plus excentrique.

On verra l'importance de cet élément, au point de vue des variations que subissent les radiations solaires avec la distance.

Quant aux dimensions réelles des orbites, elles dépendent à la fois de l'excentricité et des dimensions du grand axe, ou, si l'on veut, de la moyenne distance de chaque planète au foyer ou au Soleil. Or, ces distances varient considérablement : celle de Neptune, la planète connue la plus éloignée du Soleil, est 77,6 fois plus grande que celle de Mercure, la plus voisine du foyer commun.

Entre les durées des révolutions sidérales de deux planètes quelconques et leurs moyennes distances au Soleil, il y a une relation, une loi dont nous donnerons la formule dans la troisième partie de l'ouvrage. C'est une des lois découvertes par Képler. Cette relation est telle que, la durée de la révolution sidérale étant connue, on peut en déduire les dimensions du grand axe ou la moyenne distance au Soleil de la planète observée, relativement à celles d'une autre planète quelconque.

Un autre élément des mouvements de translation des planètes autour du Soleil, est la vitesse avec laquelle l'astre parcourt son orbite. Cette vitesse varie avec les changements de distance qui résultent de la forme elliptique de la courbe ; d'autant plus grande que cette distance est moindre, la vitesse d'une planète est donc maximum à l'époque du périhélie, minimum à l'époque de l'aphélie. La loi de ces variations est encore une des lois dues à Képler. Plus une planète est éloignée du Soleil, plus son mouvement est lent. On nomme *moyen mouvement diurne* l'arc décrit par la planète sur son orbite en un jour, en supposant que dans tout le cours de sa révolution elle se meuve avec une vitesse uniforme moyenne entre ses vitesses extrêmes[1].

Enfin, nous avons encore à dire un mot de la manière dont

1. Il résulte de cette définition que si l'on multiplie le *moyen mouvement diurne* d'une planète (ordinairement exprimé en secondes d'arc) par

on fixe la position respective des orbites planétaires. L'inclinaison ou l'angle du plan de l'orbite avec l'écliptique est un premier élément nécessaire. Ce plan coupe l'écliptique suivant une ligne qui passe par le centre du Soleil : c'est la *ligne des nœuds*, le nœud étant l'un des deux points où la planète,

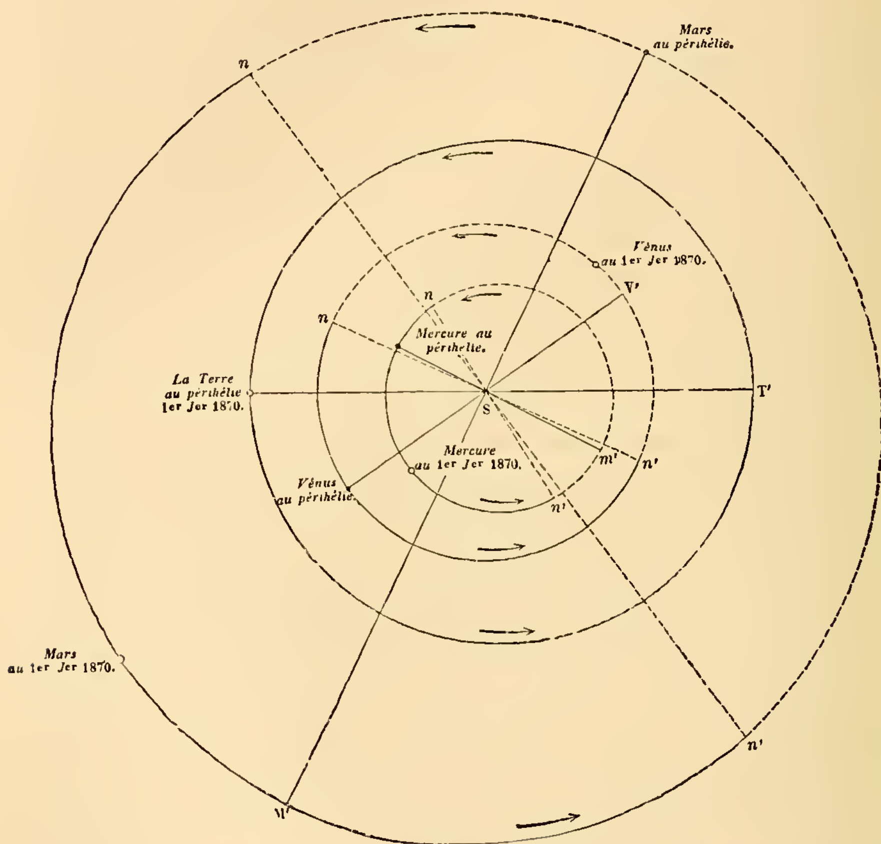


Fig. 67. Orbites des planètes moyennes; grands axes et périhélies; positions relatives de Mercure, Vénus, la Terre et Mars, au 1er janvier 1870.

dans son cours, vient traverser nécessairement le plan de l'orbite de la Terre; *nœud ascendant*, si la planète passe du sud

la durée de la révolution sidérale (exprimée en jours moyens terrestres) le produit devra être égal au nombre 1 296 000, nombre de secondes d'une circonférence entière.

au nord; *nœud descendant*, si elle va du nord au sud. Il suffit de connaître la distance angulaire de l'un des nœuds, du nœud ascendant par exemple, à l'équinoxe (qui est le zéro des longitudes) pour que la position de la ligne des nœuds soit fixée. Mais il faut, de plus, que le grand axe de l'orbite planétaire soit déterminé par la longitude d'un de ses points. Un autre élément indispensable est donc la *longitude du périhélie*. Quant à la planète, à la position qu'elle occupe sur son orbite, on la détermine en donnant sa longitude pour une époque donnée, par exemple au 1er janvier à midi moyen d'une certaine année[1].

Tels sont les éléments fondamentaux des mouvements de translation des planètes autour du Soleil. Nous allons en donner les valeurs numériques dans le tableau suivant, en nous bornant aux huit planètes principales. Les petites planètes sont trop nombreuses pour que nous puissions transcrire ici les éléments des 160 qui sont aujourd'hui connues. D'ailleurs, dans le chapitre que nous leur consacrerons, nous ferons ressortir ce que ces éléments présentent de remarquable.

Plus tard nous verrons que, à l'exception de deux, les éléments des orbites des planètes ne sont pas invariables. L'action réciproque du Soleil sur les planètes et des planètes entre

1. La planche X, qui est une représentation du système planétaire, figure les orbites des huit planètes principales, avec leurs vraies dimensions relatives. Dans l'impossibilité de tracer celles des 160 petites planètes en un espace aussi petit que l'intervalle de Jupiter à Mars, on a seulement indiqué leurs limites dans celles d'un anneau d'apparence nébuleuse. Toutes les orbites sont supposées rabattues sur le plan de l'Écliptique; on a tenu compte de leur excentricité, mais leur forme elliptique ne pouvait être figurée sur une aussi petite échelle. Il est bien entendu que les grosseurs des disques représentant le Soleil et les autres planètes sont ici arbitraires; il était impossible de leur donner leurs dimensions relatives.

Les mêmes remarques doivent s'appliquer à la figure 67, où les orbites des quatre planètes moyennes Mercure, Vénus, la Terre et Mars sont tracées rabattues sur l'orbite terrestre. Les directions des grands axes, les positions des périhélies, celles des planètes pour une époque déterminée (1er janvier 1870) s'y trouvent en outre marquées.

elles, cause dans leurs mouvements des modifications incessantes, des perturbations, que l'on nomme *inégalités périodiques* ou *inégalités séculaires*, selon que leurs périodes embrassent des temps plus ou moins longs : les excentricités, les inclinaisons, les positions des périhélies ou des nœuds sont également sujettes à ces changements. Seuls, les grands axes et les durées des révolutions sidérales sont invariables, ou si ces éléments varient, c'est à de si longs intervalles, que ni les calculs ni les observations n'ont encore pu le faire reconnaître.

ÉLÉMENTS DES ORBITES PLANÉTAIRES.

PLANÈTES.	Moyens mouvements diurnes.	Durées des révolutions sidérales.	Distances moyennes au Soleil.	Excentricités.
		j.m.		
Mercure.	14732″.419	87.9693	0.387099	0.2056048
Vénus....	5767 .670	224.7008	0.723332	0.0068433
La Terre.	3548 .193	365.2564	1.000000	0.0167701
Mars.....	1886 .518	686.9796	1.523691	0.0932611
Jupiter..	299 .129	4332.5848	5.202798	0.0482388
Saturne..	120 .455	10759.2198	9.538852	0.0559956
Uranus..	42 .233	30686.8208	19.182639	0.0465775
Neptune.	21 .554	60126.72...	30.03697	0.0087195

PLANÈTES.	Inclinaisons.	Longitudes des périhélies.	Longitudes des nœuds ascendants.	Longitudes moyennes au 1er janvier 1850.
Mercure.	7° 0′ 8″	75° 7′ 14″	46° 33′ 9″	327° 15′ 20″
Vénus....	3 23 35	129 27 15	75 19 52	245 33 15
La Terre.	0 0 0	100 21 22	0 0 0	100 46 44
Mars.....	1 51 2	333 17 54	48 23 53	83 40 31
Jupiter..	1 18 40	11 54 53	98 54 20	160 1 20
Saturne..	2 29 28	90 6 12	112 21 44	14 50 41
Uranus..	0 46 30	168 16 45	73 14 14	28 26 42
Neptune.	1 46 59	47 14 37	130 6 52	335 8 59

En résumant les notions que nous venons d'esquisser rapidement, on voit que le système solaire vu par sa tranche, et

de profil pour ainsi dire, se présenterait, pour un observateur situé à une grande distance au delà de ses limites, sous l'apparence d'un groupe de forme allongée, ayant à son centre un point lumineux, le Soleil, et de part et d'autre une multitude de petites étoiles d'inégal éclat, les planètes et les satellites, oscillant le long de trajectoires presque rectilignes. Vu de face au contraire, le système aurait l'aspect d'un groupe ayant le Soleil à son centre, et les mêmes points lumineux décriraient des courbes fermées presque circulaires.

§ 2. LES MOUVEMENTS DE ROTATION DES PLANÈTES.

Le mouvement uniforme de rotation, que la Terre effectue en 23 heures, 56 minutes, 4 secondes, c'est-à-dire en un *jour sidéral*, autour d'un axe qui est le plus petit de ses diamètres, nous est démontré de diverses manières : directement, par le mouvement apparent et contraire du ciel entier, Soleil, Lune, étoiles, mouvement qui a lieu d'Orient en Occident et qu'on nomme le mouvement diurne; indirectement, par la déviation qu'éprouvent les corps en tombant d'une grande hauteur, ou aussi par des expériences faites à l'aide de certains appareils mécaniques, pendules et gyroscopes. Nous n'entrerons dans aucun détail à cet égard; on trouvera l'exposé des preuves dans tous les traités de cosmographie.

La Terre étant une planète, une simple analogie porterait à conclure que toutes les planètes ont de semblables mouvements de rotation; mais on a des témoignages certains de l'existence d'un pareil mouvement chez plusieurs d'entre elles. En examinant au télescope les disques de Mercure, de Vénus, de Mars, de Jupiter et de Saturne, les astronomes ont pu suivre les changements de position de certaines taches permanentes existant à leur surface, et en conclure que ces cinq planètes tournent, comme la Terre, autour d'un axe de direc-

tion invariable. La durée de chacune de ces rotations a été calculée avec une approximation suffisante pour les trois dernières, mais qui laisse encore à désirer pour Vénus et Mercure. Les deux planètes les plus éloignées, Uranus et Neptune, n'ont encore rien donné à l'observation qui permette de conclure positivement à un mouvement de rotation; quant aux 160 petites planètes aujourd'hui connues, c'est à peine si l'étude télescopique a permis de mesurer les diamètres des plus volumineuses; la grande majorité ne laisse voir que des points stellaires. Mais il y a de grandes probabilités que tous les corps célestes du système sont affectés d'un mouvement de rotation.

Toutes les rotations connues paraissent soumises aux lois suivantes : Le mouvement de rotation est uniforme et sa durée constante pour chaque planète ; l'axe autour duquel il a lieu, généralement incliné sur le plan de l'orbite, est un diamètre fixe du corps et son inclinaison reste constante, ou du moins, comme on le voit pour l'axe terrestre, ne varie que dans des limites restreintes et dans des périodes fort longues; enfin, le sens du mouvement est le même que celui des mouvements de translation. Tous ces mouvements se font d'Occident en Orient.

Précisons ce dernier point par un exemple.

Le mouvement diurne des étoiles, mouvement apparent, se fait d'Orient en Occident ; donc la rotation de la Terre a lieu d'Occident en Orient. Cela posé, quel est le sens du mouvement annuel ou de révolution autour du Soleil ? Le voici :

L'axe de rotation — la ligne des pôles de la Terre — est incliné d'environ 66° sur le plan de l'orbite ou sur l'écliptique. L'un des pôles est donc d'un côté de ce plan, l'autre pôle de l'autre côté, puisque c'est le centre du globe terrestre qui décrit l'orbite. Pour préciser, supposons un observateur posté au centre même de la Terre, les pieds sur le plan de l'orbite, et la tête du côté du pôle nord terrestre, ou ce qui revient au

même, du pôle nord du ciel. Dans cette position, il verra tous les points de la Terre tourner de *sa droite à sa gauche*, dans le sens marqué par la flèche de la figure 68. Ainsi, pour lui, *rotation de droite à gauche*, ou bien *rotation d'Occident en Orient*, sont des expressions synonymes.

Le plan de l'orbite terrestre passe par le centre du Soleil. Supposons que notre observateur s'y transporte, mais sans cesser d'avoir les pieds sur le plan et la tête dans l'hémisphère nord du ciel. Là encore, il verra le Soleil tourner sur lui-même de *sa droite à sa gauche*, c'est-à-dire d'*Occident en Orient*. Or, tel est encore précisément, pour les autres corps du système, le sens de leurs mouvements de rotation.



Fig. 68. Sens du mouvement de rotation et du mouvement de translation des planètes. La Terre.

Eh bien, la même loi s'applique à tous les mouvements de circulation, soit des planètes autour du Soleil, soit des satellites autour des planètes[1]. Reportons-nous à la figure 68. La ligne courbe qui représente un arc de l'orbite de la Terre est parcourue par notre planète dans le sens des flèches qui l'accompagnent, c'est-à-dire de *droite à gauche* ou d'*Occident en Orient* pour l'observateur qui est au centre du mouvement ou du Soleil, les pieds sur le plan de l'orbite et la tête dans l'hémisphère nord du ciel.

Rien de plus simple, on le voit, rien de plus aisé à se représenter que les deux genres de mouvement des corps du monde planétaire, que la loi générale qui en régit le sens.

C'est le mouvement de rotation de la Terre sur son axe qui produit les alternatives du jour et de la nuit en chacun des points de la surface; c'est la combinaison de ce mouvement

1. On verra plus tard qu'il y a exception pour les satellites d'Uranus.

avec le mouvement elliptique autour du Soleil qui détermine les périodes astronomiques des saisons; c'est enfin l'inclinaison de l'axe sur l'orbite qui, en faisant varier dans les cours de l'année la grandeur de l'arc diurne décrit par le Soleil, et sa hauteur sur l'horizon, est la cause principale des variations de la lumière, de la chaleur aux diverses latitudes, et donne lieu aux inégalités qui constituent les saisons météorologiques.

Des phénomènes de même ordre ont évidemment lieu dans toutes les planètes du monde solaire. Mais on comprend quelle variété doit exister sous ce rapport, selon la durée de l'année dans chacune d'elles, la distance de l'astre au Soleil, la forme plus ou moins elliptique de l'orbite, selon la durée du mouvement de rotation et l'inclinaison de son axe. C'est ce que nous ne tarderons pas à constater, quand nous passerons en revue chacun des corps du système.

§ 3. ÉLÉMENTS DE LA CONSTITUTION PHYSIQUE DES PLANÈTES.

D'autres données, non moins intéressantes que les mouvements de translation et de rotation, achèveront de nous renseigner sur la constitution physique de chaque planète. Bornons-nous à les énumérer.

Nous aurons à dire quelles sont les formes et les dimensions réelles des globes planétaires : le télescope qui, au lieu d'un point lumineux, laisse voir la forme réelle de la planète, et la mesure du disque ou du diamètre apparent combinée avec le calcul des distances, permettent de déterminer ces dimensions et ces formes

La mécanique céleste, nous l'avons vu déjà pour le Soleil, donne la masse de chaque planète rapportée à la masse solaire ou à celle de la Terre prise pour unité.

De la masse et du volume, on déduit la valeur de la densité

moyenne de la matière de chaque corps, et aussi celle de l'intensité de la pesanteur à la surface.

ÉLÉMENTS PHYSIQUES DES PLANÈTES.

Noms des planètes.	Durée de la rotation.	Inclinaisons des axes sur les orbites	Diamètres apparents à la distance 1	Diamètres réels Terre = 1	Volumes Terre = 1
Mercure.	0j 24h 5m	20° ?	6″.70	0.378	0.054
Vénus....	23 21	40°12′	16″.90	0.954	0.868
La Terre.	23 56	66°32′32″	17″.72	1.000	1.000
Mars.....	24 37	61°18′	9″.57	0.540	0.157
Jupiter..	9 55	86°54′	197″.76	11.160	1389.996
Saturne..	10 30	64°	168″.82	9.527	864.694
Uranus..	»	»	74″.81	4.221	75.253
Neptune.	»	»	78″.10	4.407	85.605

Noms des planètes.	MASSES.		DENSITÉ.		Pesanteur à la surface.
	Soleil = 1	Terre = 1	Terre = 1	Eau = 1	
Mercure.	$\frac{1}{4\,348\,000}$	0.075	1.376	7.48	0.521
Vénus....	$\frac{1}{412\,150}$	0.787	0.905	4.93	0.864
La Terre.	$\frac{1}{324\,479}$	1.000	1.000	5.44	1.000
Mars... .	$\frac{1}{2\,968\,300}$	0.109	0.714	3.88	0.382
Jupiter..	$\frac{1}{1050}$	309.028	0.236	1.28	2.581
Saturne..	$\frac{1}{3512}$	92.394	0.121	0.66	1.104
Uranus. .	$\frac{1}{20574}$	15.771	0.209	1.14	0.883
Neptune.	$\frac{1}{17500}$	18.542	0.216	1.17	0.953

Ces divers éléments se trouvent rassemblés, avec ceux relatifs à la rotation, dans le tableau précédent : c'est par là que nous terminerons les notions générales relatives au monde planétaire. Nous allons maintenant aborder en particulier chaque planète, en suivant l'ordre qui semble le plus naturel, celui de leurs distances au Soleil.

I

MERCURE ☿.

§ 1. MOUVEMENTS, DISTANCES AU SOLEIL ET A LA TERRE.

Lorsque le ciel est pur, que l'atmosphère à l'horizon n'est pas trop chargée de vapeurs, on aperçoit quelquefois, le soir après le coucher du Soleil, une étoile dont la vive lumière se détache en scintillant sur la lueur rougeâtre du crépuscule. Sa distance apparente au-dessus de l'horizon, d'abord très-petite, augmente peu à peu chaque soir, mais sans dépasser jamais la sixième partie d'un demi-cercle de la voûte céleste.

Cette étoile est la planète Mercure.

En continuant de l'observer pendant des soirées favorables, on la verra se rapprocher peu à peu du Soleil, puis disparaître sous la clarté éblouissante de l'astre radieux : elle se couche alors en même temps que lui. Quelques jours après, c'est le matin, avant le lever du Soleil, que la même étoile, dégagée des rayons de cet astre, se lèvera de plus en plus tôt, montant de jour en jour au-dessus de l'horizon à des hauteurs croissantes, dont le maximum, à l'Orient, sera précisément égal à celui qu'elle avait précédemment atteint à l'Occident. Enfin, peu à peu, elle reviendra sur ses pas, se rapprochant du Soleil, jusqu'au moment où elle disparaîtra de nouveau dans ses rayons.

Mercure accomplit donc de la sorte une oscillation complète autour du Soleil, oscillation qu'il répète indéfiniment, et dont la durée varie entre cent six et cent trente jours.

Les anciens, qui ne connaissaient pas le vrai système du monde, trompés par la double apparition de Mercure, tantôt après le coucher, tantôt avant le lever du Soleil, crurent d'abord qu'il s'agissait de deux astres distincts : ils nommèrent l'un, Apollon, dieu du jour et de la lumière, et l'autre, Mercure, dieu des voleurs. Les Indiens, les Égyptiens lui donnè-

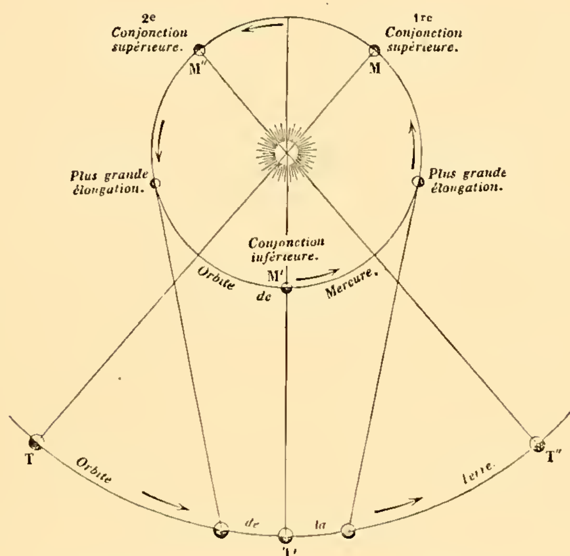


Fig. 69. Explication du mouvement apparent de Mercure.

rent de même deux noms différents : Set ou Horus chez les derniers, Boudha et Rauhinêya chez les autres. Mais les observateurs finirent par remarquer qu'une seule des deux étoiles était visible à la fois, et que l'apparition de l'une coïncidait à peu de chose près avec la disparition de l'autre : de là à conclure leur identité, il n'y avait qu'un pas.

Le mouvement apparent de Mercure sur le ciel, qui consiste ainsi qu'on vient de le voir en une double oscillation, tantôt à l'Occident, tantôt à l'Orient du Soleil, s'explique de

la façon la plus simple par la combinaison de son propre mouvement de translation avec celui de la Terre. Insistons sur les circonstances de ce mouvement apparent, circonstances que nous retrouverons les mêmes, sauf les différences de grandeur, de vitesse, etc.... pour la planète Vénus. Vénus et Mercure, en effet, sont l'une et l'autre des planètes inférieures; leurs distances au Soleil étant moindres que la distance de la Terre, leurs orbites sont enveloppées par l'orbite terrestre.

Quand Mercure se trouve en M à l'opposé du Soleil relativement à la Terre T, on dit qu'il est dans sa *conjonction supérieure;* à ce moment, il se trouve ou bien caché par le Soleil, ou bien plongé dans ses rayons : il est invisible. A partir de ce point, la planète se meut sur son orbite dans la direction indiquée par la flèche (fig. 69), et passe à l'Orient du Soleil; en sortant de ses rayons, elle devient visible, et semble s'écarter de plus en plus, pendant que la Terre se meut elle-même sur son orbite. Sa vitesse apparente va alors en diminuant peu à peu jusqu'à ce qu'elle paraisse stationnaire. Puis, ayant atteint sa plus grande distance apparente à l'Orient du Soleil, ce qu'on nomme son *élongation maximum*, elle va paraître se rapprocher de plus en plus de l'astre, en décrivant une portion de son orbite plus voisine de nous, avec une vitesse croissante. Une seconde fois, la planète disparaît dans les rayons du Soleil, et, atteignant le point M', où elle est située entre l'astre et la Terre T', elle arrive à sa *conjonction inférieure*.

En continuant sa route dans le même sens, Mercure se voit à l'Occident du Soleil, et fait alors la même oscillation en passant par une position où il semble stationnaire. Enfin, arrivé au point M'', à l'opposé du Soleil, par rapport à la Terre T'', il se retrouve à une nouvelle conjonction supérieure. Si la Terre eût été immobile, les points M et M'' seraient identiques, et la durée de la révolution apparente de Mercure serait la même que la durée d'une révolution inté-

grale de la planète autour du Soleil. Comme il n'en est pas ainsi, Mercure met plus de temps à revenir en ligne droite avec le Soleil, et décrit encore l'arc MM″ (en moyenne de 116°) au delà d'une circonférence entière, de sorte que sa *révolution synodique* est plus longue que sa *révolution sidérale*[1]. D'ailleurs, comme on l'a vu plus haut, la révolution synodique varie entre cent six et cent trente jours, et les plus grandes élongations de Mercure varient aussi entre 16° et 29° : la cause de ces variations est dans l'excentricité de l'orbite, qui, au lieu d'être un cercle, est très-sensiblement ovale ou elliptique, ainsi que le montre la figure 67.

Mercure fait un tour entier autour du Soleil, ou achève sa révolution sidérale, en 88 jours environ (plus exactement en $87^j,9693$, ou 87 jours 23 heures 15 minutes 46 secondes). Son année est donc un peu moins longue que le quart d'une année de la Terre. L'orbite décrite pendant ce temps autour du Soleil est, relativement, la plus allongée des orbites planétaires (l'excentricité est plus de 12 fois celle de l'orbite terrestre), de sorte que les distances de la planète au foyer du mouvement varient entre les limites suivantes, la distance moyenne de la Terre et du Soleil étant prise pour unité :

Distance aphélie	0.46669	69 000 000	kilom.
Distance moyenne.	0.38710	57 250 000	—
Distance périhélie.	0.30750	45 500 000	—
Dimensions de l'orbite.		356 000 000	—

Il y a une grande différence, on le voit, entre les distances

1. La révolution sidérale d'une planète s'entend du parcours intégral de l'orbite supposée invariable — ce qui n'est pas complétement exact, puisque la forme et la position de la courbe subissent le plus souvent des altérations provenant de l'action réciproque des masses planétaires et de la masse du Soleil. Sa durée est l'intervalle de temps qui s'écoule entre deux passages consécutifs de l'astre au même point de la courbe, de sorte que, vu du Soleil, il serait revenu coïncider avec le même point du ciel, avec la même étoile. — La révolution synodique est le retour de la planète à une même position par rapport au Soleil vu de la Terre.

extrêmes, puisque la plus grande surpasse la plus petite de moitié[1], ce qui équivaut à 23 500 000 kilomètres, près de six millions de lieues.

Les dimensions de l'orbite de Mercure atteignent 356 millions de kilomètres ou, en nombre rond, 89 millions de lieues; comme la planète les parcourt entièrement en 88 jours, sa vitesse moyenne sur son orbite est de 4 050 000 kilomètres par jour, ou de 47 kilomètres environ par seconde. C'est la plus grande des vitesses planétaires : elle dépasse celle de la Terre de moitié. Plus tard, du reste, nous verrons que plus une planète s'éloigne du Soleil, plus sa vitesse se ralentit, de sorte que cette vitesse, maximum au périhélie, est minimum à l'aphélie. Pour Mercure, elle est de près de 60 kilomètres dans la première position, et dans la deuxième, elle s'abaisse à 40 kilomètres par seconde.

Reportons-nous maintenant à la figure 67 où les orbites de Mercure et de la Terre sont tracées, avec leurs vrais rapports de position et de grandeur. Il est aisé de voir que les distances des deux planètes doivent considérablement varier suivant leurs positions relatives, qu'elles sont les plus faibles possible vers les époques où Mercure se trouve en conjonction inférieure, les plus grandes au contraire près des conjonctions supérieures, quand Mercure est au delà du Soleil. Mais, dans ces positions même, Mercure est tantôt plus rapproché tantôt plus éloigné de la Terre, à cause de la forme elliptique de son orbite et de celle de l'orbite terrestre, et aussi à cause de l'inclinaison des plans de chacune d'elles, inclinaison qui est d'environ 7 degrés. Tout calcul fait, la plus petite distance des deux planètes se réduit à environ 80 millions de kilomètres; la plus considérable monte à 215 millions : elle est donc presque le triple de la première.

1. C'est ce qu'exprime l'excentricité de l'orbite, égale au nombre 0.2056048, qui est le rapport de la différence des distances aphélie et périhélie au grand axe ou au double de la distance moyenne.

§ 2. MERCURE VU AU TÉLESCOPE.
PHASES, DIMENSIONS APPARENTES ET RÉELLES.

Mercure se voit assez rarement à l'œil nu, surtout dans nos climats ou dans les latitudes plus septentrionales. Le mouvement diurne de la sphère étoilée est trop oblique et la planète s'élève à une trop faible hauteur au-dessus de l'horizon, même dans ses plus grandes digressions à l'Orient ou à l'Occident du Soleil, pour n'être pas cachée par les brumes du matin ou du soir[1].

Si, au lieu de se borner à regarder Mercure à la vue simple, on emploie, pour l'observer, une lunette d'un assez fort pouvoir grossissant, on trouve que sa forme varie selon l'époque de l'observation. Il en est de même de sa grosseur apparente.

Parlons d'abord de la forme. Mercure, dans le cours d'une de ses oscillations, présente des phases entièrement analogues aux phases lunaires. C'est d'abord un disque lumineux, à peu près circulaire, ou mieux semblable à la Lune deux ou trois jours avant son plein, qui peu à peu se rétrécit du côté de l'Orient, jusqu'à n'être plus qu'un demi-cercle, à l'époque de son plus grand éloignement apparent du Soleil; puis la forme de croissant caractérise de plus en plus le disque de la planète, jusqu'à ce qu'elle ne soit bientôt plus visible que sous la forme d'un mince filet lumineux[2]. Voici quelques-unes de ces

1. Dans les latitudes plus méridionales, l'observation en est naturellement plus fréquente. Voilà pourquoi les Grecs, les Chaldéens purent fournir à Ptolémée un assez grand nombre d'observations de Mercure. Copernic se plaignait en mourant de ne l'avoir pas vu une seule fois dans sa longue vie d'astronome. Delambre dit ne l'avoir observé à l'œil nu qu'une fois. En février et mars de l'année 1868, tout le monde a pu voir, dans nos climats, la lumière rougeâtre de Mercure étinceler à l'horizon après le coucher du Soleil.

2. C'est surtout quand Mercure se trouve dans la portion de son orbite tournée vers la Terre que ses phases sont nettement visibles; il paraît alors

phases, où l'accroissement progressif des dimensions apparentes est aussi marqué dans des proportions exactes (fig. 70).

Les mêmes apparences se succèdent[1], mais dans un ordre



Fig. 70. Phases de Mercure, visibles le soir, après le coucher du Soleil.

inverse, si l'on observe Mercure pendant sa période d'étoile du matin. Les voici (fig. 71) :

Les phases de Mercure prouvent que cette planète a la forme



Fig. 71. Phases de Mercure, visibles le matin, avant le lever du Soleil.

d'un globe sphéroïdal, non lumineux par lui-même, mais réfléchissant la lumière du Soleil.

L'explication des phases de Mercure est des plus simples.

sous forme de croissant. Mais on ne le voit jamais complétement rond à la lunette, parce que, étant alors à sa conjonction supérieure, il disparaît dans les rayons solaires ; à moins cependant qu'il ne passe au-devant du Soleil, ce qui arrive dans quelques-unes de ses conjonctions inférieures : en ce cas, il se montre sous la forme d'un disque complétement obscur.

Il suffit, pour s'en rendre compte, de considérer les positions que la planète occupe sur son orbite par rapport à celle de l'observateur situé sur la Terre en T (fig. 72). Quand Mercure est en M, ayant même longitude que le Soleil, mais entre cet astre et la Terre, il est dans sa conjonction inférieure. Il tourne alors vers nous son hémisphère obscur et n'est visible que si sa latitude, inférieure au demi-diamètre solaire (entre 15′50″ et 16′10″), le fait se projeter sur le disque même du Soleil, circonstance qui se présente d'ordinaire dans les mois de mai ou de novembre. Dans ce cas, Mercure se voit, pendant tout le temps de son *passage*, comme une tache ronde et noire qui met au plus sept ou huit heures à traverser le disque.

En passant à l'occident du Soleil, Mercure découvre peu à peu la portion orientale de son hémisphère éclairé, sous la forme d'un croissant de moins en moins délié, et quand il atteint la position M′, c'est-à-dire l'une de ses quadratures, on voit de la Terre tout un demi-cercle de cet hémisphère. En s'éloignant, ses dimensions apparentes diminuent, et sa forme est convexe des deux côtés ; à sa conjonction supérieure, on le verrait entièrement rond, s'il n'était, ou occulté par le Soleil, ou noyé dans ses rayons. La seconde partie de sa révolution synodique lui fait reprendre en sens inverse les mêmes positions relatives et les mêmes apparences, ainsi qu'il est aisé de le comprendre à la seule inspection de la figure.

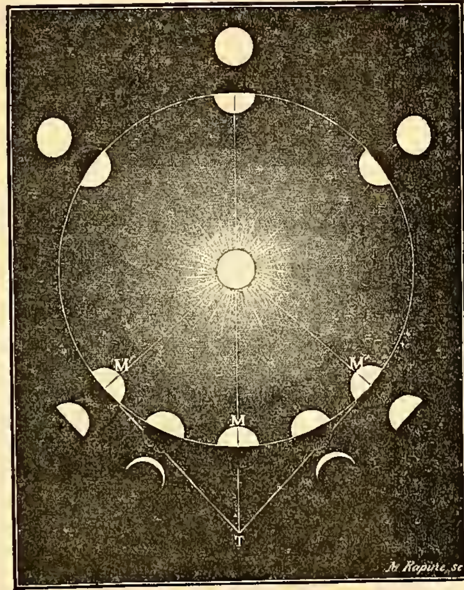


Fig. 72. Explication des phases de Mercure.

Il est très-difficile de mesurer le diamètre apparent de Mercure dans ses diverses phases brillantes : l'éclat de sa lumière, sa position voisine de l'horizon dans les vapeurs du matin ou du soir, rendent ses contours mal définis. C'est pendant ses passages sur le Soleil que les circonstances propres à une telle mesure sont les plus favorables ; même alors, l'irradiation qui varie selon les instruments et les conditions atmosphériques[1] rend la mesure difficile. La valeur trouvée par Bessel (pendant le passage du 5 mai 1832) est celle qui paraît inspirer le plus de confiance ; elle diffère peu de celle donnée par Cassini (passage de 1736). Rapporté à la distance 1, c'est-à-dire à la distance moyenne de la planète à la Terre ou de la Terre au Soleil, le diamètre de Mercure vaut 6″.70. Il atteint 12″.2 à

1. Quand l'on regarde, à une certaine distance, un objet brillant sur un fond sombre, ou un objet sombre sur un fond brillant, la lumière semble empiéter sur tout le contour de la ligne de séparation des deux teintes. Il en résulte qu'un disque blanc vu sur un fond noir paraît augmenter de di-

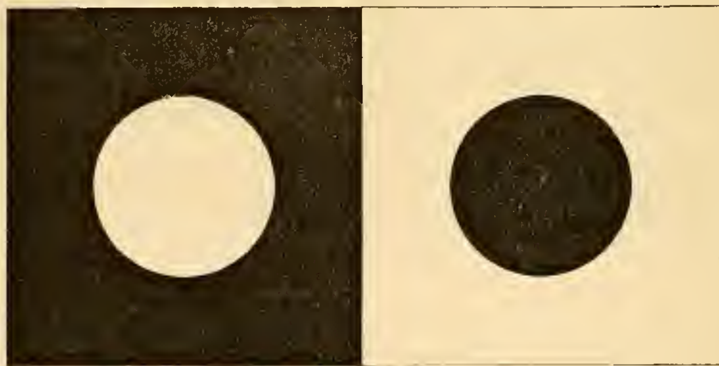


Fig. 73. Effet d'irradiation.

mensions, qu'un disque noir tracé sur un fond blanc semble au contraire rétréci. Si les deux disques sont vus à côté l'un de l'autre comme dans la figure 73, le blanc paraît plus grand que le noir, bien que leurs diamètres soient rigoureusement égaux. C'est à cet effet optique qu'on donne le nom d'*irradiation*. L'irradiation est d'ailleurs d'autant plus forte que la lumière est plus intense.

sa distance minimum, en conjonction inférieure et se réduit à 4″.6 à sa distance maximum, pendant les conjonctions supérieures. La figure 74 rend sensible à l'œil la proportion de ces dimensions moyenne et extrêmes.



Fig. 74. Dimensions apparentes relatives du disque de Mercure, à ses distances extrêmes et moyenne de la Terre.

On a cherché si les diamètres de la tache noire et ronde observée pendant les passages de Mercure sur le Soleil présentaient des traces d'inégalité. Gallet à Avignon, en 1677, Lalande à Paris, en 1779, ont cru voir un aplatissement sensible dans le disque de Mercure. Les mesures de l'astronome russe Otto Struve, pendant le passage du 5 novembre 1868, conduiraient à un aplatissement compris entre $\frac{1}{7}$ et $\frac{1}{8}$, mais les divergences des mesures micrométriques dues à divers observateurs du même passage, ont été si considérables qu'il est plus prudent de ne rien conclure[1]. N'oublions pas du reste que, si cet aplatissement existe en effet, il peut fort bien n'être pas supérieur à celui de la Terre, lequel ne dépasse guère $\frac{1}{300}$, et qu'alors la différence du plus grand au



Fig. 75. Mercure et la Terre; dimensions comparées.

1. La moyenne de 17 mesures faites par M. Wolf donnait 9″.63 pour le diamètre. M. Stéphan ne trouvait que 7″.8. Les deux diamètres mesurés par M. Struve étaient, le plus petit, égal à 6″.32, le plus grand à 7″.36, c'est-à-dire encore moindre que celui de M. Stéphan. Le calcul indiquait 10″.10 selon les Tables de M. Le Verrier et 9″.80 selon la *Connaissance des Temps*. De telles divergences obligent à conserver provisoirement la mesure de Bessel citée plus haut et ramenée à la distance 1.

plus petit diamètre de Mercure, dans les passages où le maximum de 12″ est atteint, serait au plus de 0″.04, quantité bien inférieure aux erreurs d'observation.

Des dimensions apparentes, il est aisé de passer aux dimensions réelles. En effet, le diamètre de Mercure et celui de la Terre vus du Soleil à leurs moyennes distances étant 6″.7 et 17″.72, le rapport de ces deux nombres ou 0.378 donne le diamètre de Mercure, considéré comme sphérique. 4820 kilomètres ou 1205 lieues, en est la traduction en mesures itinéraires usuelles. La périphérie du globe de Mercure, ou la longueur d'un de ses grands cercles, est alors de 15 000 kilomètres. Voici d'ailleurs les dimensions de la planète, diamètre, surface et volume, rapportées à celles de la Terre et du Soleil, dans l'hypothèse de l'exactitude des mesures de Bessel et de la parallaxe adoptée 8″.86 :

		Diamètre.	Surface.	Volume.
Dimensions de Mercure comparé	à la Terre. . .	0.378	0.143	0.054
	au Soleil. . . .	$\frac{1}{286.54}$	$\frac{1}{80\,250}$	$\frac{1}{23\,641\,000}$

Mercure est la moins volumineuse des huit planètes principales. Il faudrait près de 24 millions de globes égaux au sien pour avoir le volume du Soleil ; il en faudrait 18 et demi pour former celui de la Terre ; enfin, Mercure est 2 fois et 7 dixièmes aussi gros que la Lune.

§ 3. MOUVEMENT DE ROTATION DE MERCURE.

Mercure tourne sur lui-même, ou autour d'un de ses diamètres, en 24 heures 5 minutes environ.

Comment est-on parvenu à déterminer ce mouvement de rotation et à en mesurer la durée? C'est ce que nous allons indiquer sommairement. Schrœter, en observant avec soin et assiduité, pendant les années 1800 et 1801, les phases de

Mercure, a constaté diverses inégalités périodiques dans l'apparence des contours du disque de la planète. La ligne de séparation de la partie éclairée et de la portion que son obscurité rend invisible, au lieu de présenter une forme régulière et elliptique, a paru dentelée (fig. 76), comme si, en ces points, le sol de la planète était accidenté; d'autres fois, quand Mercure se présentait, dans les lunettes, sous la forme d'un mince croissant lumineux, l'une des cornes, la corne méridionale, paraissait tronquée, tandis que la corne boréale restait effilée. Mais ces inégalités, ces accidents du sol de la planète n'étaient

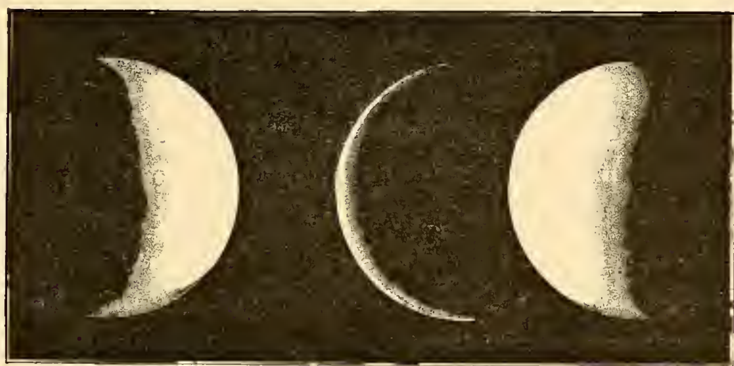


Fig. 76. Croissant de Mercure, d'après Schrœter. Échancrures du bord. Troncature de la corne australe.

pas visibles à toute époque; ils disparaissaient pour reparaître à des intervalles dont la périodicité témoignait avec évidence d'un mouvement de rotation du globe de Mercure. C'est surtout en étudiant les retours de la troncature de la corne australe (fig. 76), que Schrœter et Harding ont pu en conclure pour la durée de la rotation, une moyenne de 24 heures, 5 minutes et 28 secondes.

Les mêmes astronomes ont aussi aperçu des taches obscures, sous forme de bandes parallèles (fig. 77); ces bandes, absolument noires dans certaines de leurs parties, ont permis aussi de constater le mouvement de rotation. Mais ce n'est qu'en

les supposant parallèles à l'équateur de la planète — hypothèse probable, mais non certaine — qu'ils en ont conclu pour l'inclinaison de l'équateur de Mercure sur le plan de l'orbite, un angle de 70 degrés. L'axe de rotation ne ferait donc que 20 degrés avec le même plan. Mais il faudra se rappeler, quand nous en tirerons des conséquences pour la météorologie de Mercure, que tous ces résultats auraient besoin d'être confirmés par des observations nouvelles.

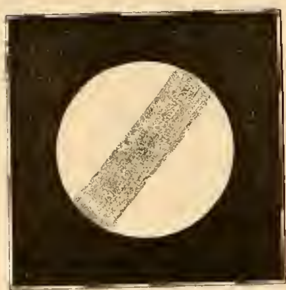


Fig. 77. Bandes équatoriales de Mercure; d'après Schrœter.

Partons du nombre cité plus haut, qui donne 24 heures 5 minutes pour la durée de la rotation.

Cette durée est celle d'un jour sidéral sur Mercure; elle dépasse de 9 minutes seulement la durée du jour sidéral terrestre. Comme la durée de l'année est 87.9693 jours moyens de la Terre, un calcul simple montre que l'année de Mercure comprend environ 87 rotations et deux tiers (87.637), et qu'ainsi le nombre des jours solaires de l'année, toujours inférieur d'une unité à celui des jours sidéraux, y est de $86^{j}637$. Chacun de ces jours solaires moyens est de 24 heures 21 minutes. S'il y a des habitants sur Mercure, et s'ils règlent leur calendrier d'après les mêmes principes que nous le nôtre, deux de leurs années sur trois sont bissextiles ou ont 88 jours, et la troisième en a 87 seulement.

De quelle manière ces 87 jours mercuriens se partagent-ils entre les saisons astronomiques de la planète? Il faudrait, pour le dire, connaître la position exacte de la ligne des nœuds de l'équateur sur le plan de l'orbite : nous l'ignorons. Mais on peut supposer que cette ligne coïncide avec le grand axe de l'orbite, et qu'ainsi le périhélie et l'aphélie soient précisément les points des solstices. Dans ce cas, l'automne et l'hiver de l'hémisphère boréal, ou le printemps et l'été de

l'hémisphère austral[1], seraient les deux saisons les plus courtes et dureraient seulement 16 jours ; les deux saisons opposées seraient plus longues de plus de 11 jours, et dureraient par conséquent chacune 27 jours un tiers. Cette inégalité considérable provient de la forte excentricité de l'orbite.

La même raison doit être cause d'une variation très-grande dans l'intensité des rayons solaires, lumineux ou calorifiques, reçus par chaque hémisphère dans le cours de l'année. Sur

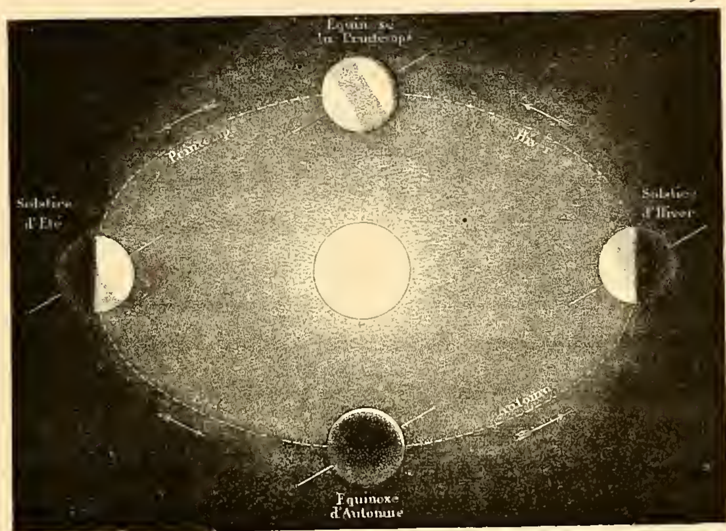


Fig. 78. Les saisons sur Mercure ; positions de la planète et de son axe de rotation aux équinoxes et aux solstices.

Mercure, cette intensité moyenne — nous l'avons vu — est 6.670 fois aussi forte que sur la Terre, abstraction faite bien entendu de toute absorption atmosphérique. Mais à l'époque du périhélie, la radiation est beaucoup plus forte qu'à l'aphélie ; la proportion est de 2.303 à 1. Ainsi, tandis qu'à l'aphélie

1. Ceci n'est aussi qu'une hypothèse, dépendant du sens de l'inclinaison de l'axe sur le plan de l'orbite : il est possible que l'axe soit incliné dans un sens précisément inverse, et qu'il faille dire d'un hémisphère ce que nous disons ici de l'autre.

cette radiation n'est guère que quatre fois et demie celle du Soleil sur la Terre, au périhélie elle la dépasse 10 fois. Des variations aussi considérables doivent produire, dans les saisons, des contrastes d'autant plus étonnants — à notre point de vue — que leur succession a lieu avec une rapidité plus grande, et que 43 jours seulement séparent les extrêmes. Nous allons voir que l'inclinaison de l'axe de rotation, si elle est bien de 20 degrés seulement comme Schrœter et Harding l'ont assuré, ajoute encore à ce que de telles conditions météorologiques paraissent avoir d'intolérable.

Entrons sur ce point dans quelques détails.

Nous venons de voir que la durée du jour solaire est, sur Mercure, de 24 heures 21 minutes. Aux équinoxes, la journée et la nuit s'y partagent donc cette durée, de sorte qu'à l'équateur pendant l'année tout entière, et pour toutes les autres latitudes à l'époque des équinoxes[1], le jour et la nuit sont seulement chacun de 10 minutes plus longs que le jour et la nuit sur la Terre dans les mêmes circonstances. Mais aux autres époques de la courte année de Mercure, les variations de la durée de ces deux éléments, et, par suite, les variations des saisons et des climats y sont beaucoup plus tranchées qu'à la surface du globe terrestre, ce qui tient à l'inclinaison considérable de l'équateur sur l'orbite. Au solstice d'été, le Soleil passe au zénith à midi dans les régions qui sont à 20 degrés seulement du pôle boréal, et ne s'y couche point pendant une partie de l'été; pendant ce temps, au contraire, les longues nuits polaires envahissent l'hémisphère austral jusqu'à

1. Mercure est à l'un ou à l'autre de ses *équinoxes*, quand le plan de son équateur passe par le Soleil : l'hémisphère éclairé renferme alors les deux pôles, et le jour et la nuit sont égaux à toutes les latitudes. Aux solstices, la planète présente l'un de ses pôles au Soleil, tandis que l'autre pôle est dans l'ombre : c'est l'époque des longs jours et des courtes nuits sur un hémisphère, des jours courts et des longues nuits sur l'autre. Nous retrouverons des positions analogues pour chaque planète; mais une explication détaillée de tous ces phénomènes sera donnée au chapitre qui concerne *la Terre*.

la latitude de 20 degrés : le contraire arrive naturellement à l'autre solstice. Ainsi, sur Mercure, des zones très-étendues à partir des deux pôles, tantôt pendant leur été jouissent constamment de la lumière du jour, tantôt pendant leur hiver sont plongées dans des ténèbres profondes. C'est à peine si, pendant une courte période, voisine de chacun des équinoxes, ces zones voient la lumière et l'ombre se succéder dans l'intervalle d'un même jour. Les zones glaciales et les zones torrides se confondent sur Mercure, et les climats tempérés n'y existent pas, ces diverses zones s'envahissant mutuellement deux fois à chaque révolution. Les régions équatoriales ayant moins de 20° de latitude boréale ou australe, ont seules le privilége de posséder toute l'année le jour et la nuit, la lumière et l'ombre, et de voir se succéder, à chaque période du jour solaire, la chaleur pendant la journée, la fraîcheur et le calme pendant les nuits. Il est vrai que si le Soleil, vers les équinoxes, s'y élève jusqu'au zénith, il s'abaisse très-près de l'horizon dans les saisons extrêmes.

§ 4. MÉTÉOROLOGIE ET CONSTITUTION PHYSIQUE DE MERCURE.

La météorologie de Mercure est donc, à bien des points de vue, totalement différente de la météorologie terrestre. Les jours et les nuits, les saisons, les climats, en n'en considérant que les conditions extérieures ou astronomiques, y sont tout autres et s'y succèdent dans un tout autre ordre que sur la Terre. Mais les conséquences qu'on en voudrait tirer pour comparer les deux planètes sous le rapport de l'habitabilité, de l'existence d'êtres organisés, végétaux ou animaux, n'en seraient pas moins conjecturales. L'intensité et la distribution de la chaleur et de la lumière pourraient être considérablement modifiées par l'interposition d'une atmosphère gazeuse et vaporeuse, dont la composition peut être semblable à celle

de l'atmosphère terrestre, mais aussi peut fort bien être totalement différente. Une question se pose donc : Mercure a-t-il une atmosphère ?

Déjà, nous l'avons vu, Schrœter a reconnu à la surface du disque, l'existence de bandes obscures, qu'il considérait comme produites par des courants réguliers, analogues aux alizés terrestres, et qu'il supposait parallèles à l'équateur de la planète. Ce sont, ou des éclaircies dans une atmosphère couverte de nuages blancs et réfléchissants, ou des nuages même, si ces vapeurs ont un moindre pouvoir réfléchissant que le sol. En tout cas, de telles bandes obscures, variables sans doute puisqu'elles n'ont été vues qu'accidentellement, sont un témoignage probable en faveur de l'existence d'une atmosphère. En voici d'autres.

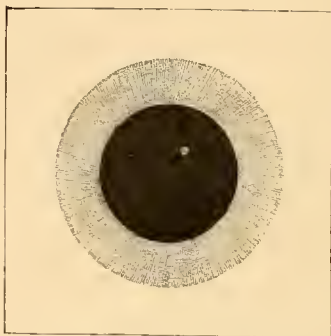


Fig. 79. Aspect du disque de Mercure pendant son passage sur le Soleil, le 7 mai 1799. Auréole nébuleuse; point brillant sur le disque. D'après Schrœter.

Dans plusieurs de ses passages sur le Soleil, la tache noire et d'ailleurs bien limitée que la planète projette sur le disque, a paru entourée d'un anneau nébuleux; mais à certains observateurs, cet anneau a semblé plus brillant que les régions environnantes du Soleil; d'autres l'ont trouvé, au contraire, moins lumineux. En 1799, Schrœter et Harding ont vu ce phénomène tel que le représente la figure 79, et en 1832 le docteur Moll dit que l'anneau nébuleux avait une teinte sombre approchant de la couleur violette : cette apparence s'explique fort bien, si Mercure est entouré d'une atmosphère absorbante. Pendant le dernier passage, celui du 5 novembre 1868, M. Huggins a vu aussi le cercle noir de Mercure entouré d'un anneau (fig. 80), mais il lui a trouvé un éclat supérieur à celui du disque solaire. C'était une sorte d'auréole dont l'éclat était légèrement plus intense que les régions voi-

sines du disque. La largeur de cet anneau était d'environ le tiers du diamètre apparent de Mercure, et on n'y remarquait aucune dégradation depuis le bord de la planète jusqu'à la limite extérieure. Il est évident que si Mercure est entouré d'une atmosphère transparente et réfringente, elle doit absorber et disperser les rayons solaires, et dès lors affaiblir leur éclat, non l'augmenter. Il semble donc probable, qu'il ne s'agit là que d'une apparence purement optique. Enfin, il nous reste à parler d'un autre genre d'observations, qui paraît démontrer l'existence d'une atmosphère autour de Mercure. Les dessins du croissant de la planète obtenus par Schrœter (voyez la fig. 76) prouvent que la ligne de séparation de la lumière et de l'ombre n'est jamais bien tranchée, ce qu'on ne peut attribuer qu'à l'absorption de la lumière solaire par les couches atmosphériques [1]. On a égale-

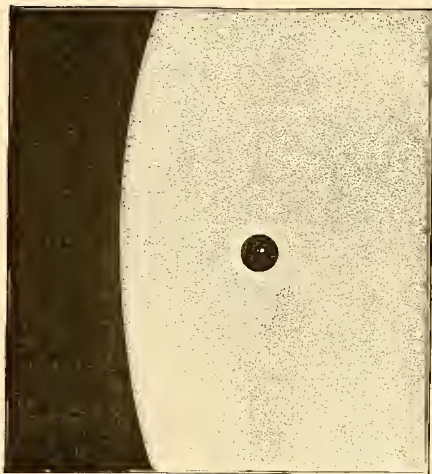


Fig. 80. Passage de Mercure sur le disque du Soleil, le 5 novembre 1868, d'après W. Huggins. Point lumineux et auréole brillante.

1. Ceci n'est pas rigoureusement exact. Plusieurs causes peuvent aussi produire l'affaiblissement de lumière dont nous parlons. Il y a d'abord un effet de pénombre provenant de ce que le Soleil ne se couche pas instantanément sur l'horizon de Mercure; mais la largeur de la zone de pénombre ne dépasserait pas 82', mesurée sur la circonférence du disque. Il y a aussi à tenir compte de la dégradation due à l'obliquité, soit des rayons solaires incidents, soit des rayons réfléchis, et enfin des inégalités qui existent sans doute sur Mercure et qui produisent, par leurs ombres, un effet semblable à celui qu'on voit sur le bord des phases de la Lune. Tout cela n'implique point l'existence d'une atmosphère, et tout cela peut être confondu avec l'effet dû à une absorption atmosphérique.

Il n'en serait pas de même, si l'on prouvait que la dégradation est due à un effet de réfraction, lequel prolongerait l'illumination au delà d'une circonfé-

ment remarqué que la largeur de la partie lumineuse ou de la phase en a paru comme diminuée. « D'après cela, disent Beer et Mædler, on peut conclure que Mercure a une atmosphère assez sensible.... »

S'il en est ainsi, nous pouvons nous faire une idée des modifications qu'une atmosphère un peu dense peut apporter à l'intensité de la lumière et de la chaleur, en comparant les jours où, sur notre Terre, le ciel est pur et sans nuages, où le Soleil darde sans obstacle ses rayons sur le sol, avec les jours sombres et gris où les nuages nous en dérobent complétement la vue. La densité de l'enveloppe atmosphérique, le plus ou moins de vapeur d'eau qu'elle renferme, la plus ou moins forte condensation de cette vapeur, peuvent singulièrement changer les effets de rayonnement de la chaleur solaire. Comparons la température d'une de nos vallées avec celle des sommités montagneuses qui l'environnent[1] : ce sera passer de l'été aux froids de l'hiver, de la chaleur brûlante de juillet aux frimas de novembre. Et cependant, le Soleil brille sur les monts comme au fond des vallées.

Enfin, la composition chimique de l'atmosphère de Mercure,

rence du disque de la planète. On l'a prouvé pour Vénus, nous le verrons plus loin; mais nous ne croyons pas qu'une semblable remarque ait été faite pour Mercure.

1. « L'air sur les hautes montagnes peut être excessivement froid, quoique le Soleil darde ses rayons brûlants. Les rayons solaires qui, dans leur contact avec la peau humaine, sont presque douloureux, restent impuissants à échauffer l'air d'une manière sensible; il suffit de se mettre parfaitement à l'ombre pour sentir le froid de l'atmosphère. Jamais, dans aucune circonstance, je n'ai tant souffert de la chaleur solaire qu'en descendant du *Corridor*, au grand plateau du Mont-Blanc, le 13 août 1857; pendant que je m'enfonçais dans la neige jusqu'aux reins, le Soleil dardait ses rayons sur moi avec une force intolérable. Mon immersion dans l'ombre du dôme du Goûté changea à l'instant mes impressions, car là, l'air était à la température de la glace. » (Tyndall, *Leçons sur la chaleur.*) — Ce n'est pas seulement à la rareté de l'air qu'il faut attribuer ce phénomène, mais au faible pouvoir absorbant de l'atmosphère, laquelle laisse passer les rayons calorifiques directement venus de la source lumineuse, tandis qu'au retour elle s'oppose à la facile transmission des rayons obscurs renvoyés par le sol.

la nature inconnue des gaz dont elle est formée, et qui sont peut-être fort différents de l'azote et de l'oxygène de l'air, sont encore de nouveaux éléments qui peuvent influer sur le climat de la planète, et sur lesquels l'analyse spectrale ne nous a fourni encore aucune donnée certaine. Voici ce que dit M. Vogel à cet égard : « Les raies principales du spectre de Mercùre coïncident absolument avec celles du spectre solaire. Il résulte de plus des observations, que certaines raies qui ne se produisent dans le spectre du Soleil que lorsque cet astre est très-bas sur l'horizon (raies telluriques) et que l'absorption par notre atmosphère est très-considérable, se retrouvent en permanence dans le spectre de Mercure. On doit donc conclure de là à l'existence d'une enveloppe gazeuse autour de Mercure, exerçant sur les rayons solaires une action absorbante égale à celle de notre atmosphère, lorsqu'elle atteint son maximum. En général, les portions les moins réfrangibles du spectre de Mercure présentent un plus vif éclat que les portions plus réfrangibles; mais il est impossible de séparer ici l'effet de notre atmosphère de celui qui est produit par l'atmosphère de la planète. »

Si Mercure a une atmosphère; si, de plus, le sol est composé de matières susceptibles de se vaporiser, si la planète par exemple renferme des mers, il est vraisemblable que son atmosphère doit être profondément et fréquemment troublée. Les transitions si rapides entre des températures extrêmes, dont il a été question plus haut, doivent dans cette hypothèse donner lieu, dans les saisons chaudes, à une abondante vaporisation, et dans les saisons froides, à une condensation non moins forte. L'atmosphère y est sans doute chargée de vapeurs, puis de brouillards et de nuages épais. Peut-être ne voyons-nous jamais ou presque jamais la surface même du sol de la planète, masquée par d'épaisses couches nuageuses dont on connaît le pouvoir réfléchissant considérable. Cela, indépendamment de la difficulté que nous avons, à cause de la proxi-

mité du Soleil, de bien voir la surface du disque, est peut-être la cause de la rareté, sinon de l'absence totale de taches obscures ou brillantes à sa surface. Nous verrons que Vénus est à peu près sous ce rapport dans le même cas que Mercure.

Est-ce aux inégalités de son sol qu'il faut attribuer les indentations ou les échancrures de la ligne de lumière, ainsi que la troncature de l'une des cornes du croissant? Il est difficile d'imaginer une autre raison de ces apparences, et c'est celle que Schrœter a cru devoir invoquer. Le même observateur a dessiné, le 31 mars 1800 (fig. 81), deux protubérances qui se voyaient près de la corne du croissant. S'il s'agissait là de montagnes, et que la proportion des dimensions du dessin fût rigoureuse, c'est $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{50}$ du diamètre qui donnerait leurs altitudes. Mais les mesures exactes n'ont sans doute point été prises. En tout cas, Mercure aurait des montagnes, et même des montagnes fort élevées, si l'on devait s'en rapporter à d'autres évaluations de l'astronome de Lilienthal. En effet, la hauteur de la montagne susceptible de produire, par l'ombre projetée, une troncature aussi étendue que celle observée à la corne australe (fig. 76), a été estimée par Schrœter égale à la 250e partie du diamètre de la planète, ce qui ferait un peu plus de 19 kilomètres. C'est une élévation considérable, si l'on songe que la plus haute montagne de notre globe, le mont Éverest, n'atteint pas 9 kilomètres, ce qui n'est guère que la 1400e partie du diamètre de la Terre. Les protubérances de la figure 81 indiqueraient jusqu'à 47 ou 95 kilomètres, altitudes bien improbables, il faut le dire.



Fig. 81. Protubérance de la corne du croissant. Montagnes de Mercure, d'après Schrœter; 31 mars 1800.

On a même cru pouvoir conclure, de l'observation par Schrœter d'un point lumineux sur le disque, l'existence de

volcans en ignition sur Mercure. Mais c'est là une conjecture bien hasardée, à notre avis, quoique une observation semblable ait été faite en 1868 par M. W. Huggins. Il faudrait supposer un cratère de formidable étendue, pour que la lumière de ses feux fût visible sur un disque aussi petit. L'explication du phénomène n'en reste pas moins un problème; on a vu là un effet de diffraction, mais alors on ne comprend pas que le point lumineux ait eu, dans les deux cas, une position excentrique sur le disque; on comprend moins encore le déplacement, constaté par Schrœter, du point lumineux relativement au bord apparent du disque de Mercure, déplacement qui semble, en tout cas, une preuve de plus à invoquer en faveur du mouvement de rotation.

Il nous reste à dire ce qu'on sait de la masse et de la densité de Mercure et aussi de l'intensité de la pesanteur à sa surface. On n'avait, au commencement de ce siècle, aucune donnée précise qui permît de calculer la masse en question. Lagrange, puis Laplace, supposant une certaine loi entre les densités des planètes et leurs distances au Soleil, la faisaient un peu moindre que la deux-millionième partie de la masse solaire. Les perturbations causées par la planète dans la marche de la comète d'Encke ont fourni un élément plus sûr, et Encke en a déduit le nombre $\frac{1}{4\,866\,000}$, à peine moitié aussi grand. M. Le Verrier a calculé la même masse d'après les perturbations de Vénus, et a donné le nombre $\frac{1}{4\,348\,000}$. Rapportée à la masse de la Terre, la masse de Mercure en est les 0.075, ou si l'on veut les $\frac{3}{40}$, un peu moins de la 13e partie. De la masse et du volume, on déduit la densité moyenne de la matière dont est formé le globe de Mercure, densité qui est 1.376, si l'on prend celle de la Terre pour unité, ou 7.5 environ, si on la compare à celle de l'eau. C'est presque la densité du fer : mais il ne faudrait pas en inférer que telle est la densité du sol de Mercure; l'analogie porte à croire que les parties centrales de la planète sont, comme celles de la Terre, plus denses que les

couches superficielles. Enfin, il est un dernier élément physique dont l'influence sur les phénomènes météorologiques, et aussi sur l'organisation des êtres vivants, à supposer qu'il en existe sur Mercure, est incontestable. Je veux parler de l'intensité de la pesanteur à la surface. Selon que cette intensité est plus ou moins grande, les mouvements musculaires, par exemple, doivent être plus ou moins aisés, exiger une dépense de force plus ou moins considérable. Eh bien, cet élément n'est, à la surface de Mercure, qu'un peu plus de moitié de la pesanteur à la surface de la Terre (0.52); un corps pesant y acquiert, au bout d'une seconde de chute, une vitesse égale à $5^{m}.28$, après avoir parcouru $2^{m}.64$ pendant cette première seconde.

Telles sont les données physiques, encore bien imparfaites et incohérentes, que l'astronomie est parvenue à recueillir sur la planète la plus voisine du Soleil. En les comparant aux éléments correspondants de la Terre, on pourra se faire toutefois une idée assez juste des ressemblances et des différences de ces deux mondes, qui circulent dans des régions du ciel très-rapprochées les unes des autres, eu égard à l'ensemble des astres du système planétaire.

II

VÉNUS ♀.

§ 1. MOUVEMENTS DE TRANSLATION ; DISTANCES AU SOLEIL ET A LA TERRE.

Comme Mercure, Vénus est tantôt une étoile du matin, tantôt une étoile du soir, visible avant le lever ou après le coucher du Soleil. Seulement, ses oscillations périodiques de part et d'autre de l'astre radieux ont une amplitude et une durée beaucoup plus grandes, et leurs variations à ces deux points de vue se trouvent renfermées entre des limites plus étroites. La raison de ces différences est toute simple : c'est que l'orbite décrite par Vénus entre le Soleil et la Terre est plus grande que celle de Mercure, et a une excentricité plus faible : elle diffère beaucoup moins d'une circonférence de cercle (fig. 68).

Vénus est plus souvent et plus aisément visible à l'œil nu que Mercure, précisément parce qu'elle s'éloigne plus des rayons solaires et se dégage ainsi davantage des lueurs du crépuscule et de l'aurore. Ses plus grandes digressions à l'Orient et à l'Occident du Soleil atteignent en effet 48 degrés. Quelquefois même, la planète est visible à l'époque de ses conjonctions : ce qui arrive quand sa latitude, c'est-à-dire sa hauteur au-dessus ou au-dessous du Soleil relativement au plan de l'orbite de la Terre, est assez grande.

Les anciens avaient donné deux noms à Vénus, selon qu'elle faisait son apparition après le coucher ou avant le lever du Soleil : à l'origine, c'était pour eux sans doute deux astres différents, ainsi qu'ils le croyaient de Mercure. Le matin ils l'appelaient Lucifer (φωσφόρος, *porte-lumière*); Vesper ou Hespérus (ἕσπερος) était l'étoile du soir. C'est l'Étoile du Berger de nos campagnes.

Qui ne connaît l'Étoile du Berger? Qui n'a contemplé sa blanche lumière à la fois douce et vive, rarement scintillante, mais parfois assez intense pour faire porter ombre aux objets sur le sol[1]. Quand un nuage léger vient à voiler la portion du ciel qu'elle occupe, une forte lueur indique encore sa présence au centre de l'anneau lumineux formé par les molécules éclairées du nuage interposé. L'éclat de Vénus est si vif dans ces circonstances, qu'on peut l'apercevoir en plein jour : c'est de beaucoup la plus blanche et la plus brillante des étoiles du ciel tout entier.

Le mouvement apparent de Vénus sur la voûte étoilée est semblable à celui de Mercure, et s'explique de la même manière, de sorte que nous n'entrerons point dans de plus grands détails à cet égard. L'intervalle entre deux conjonctions successives, soit inférieures, soit supérieures, est en moyenne de 584 jours[2] : c'est la durée de sa révolution synodique, qui oscille d'ailleurs entre 592 jours et 577 jours.

Quant à sa révolution sidérale, elle est d'environ 225 jours moyens terrestres ($224^{j}.70079$ ou $224^{j}\,16^{h}49^{m}8^{s}$); c'est le temps que Vénus emploie à parcourir entièrement son orbite, et qui

1. « Dans des circonstances favorables, dit sir J. Herschel, Vénus projette une ombre assez forte. On doit recevoir cette ombre sur un fond blanc. Une fenêtre ouverte dans une chambre à muraille blanchie est la meilleure disposition. Dans une telle situation, j'ai observé non-seulement l'ombre, mais les franges de diffraction qui en bordent le contour. » (*Outlines of astronomy.*)

2. Sur cette durée totale de 584 jours, 542 jours sont employés par la planète à parcourir la portion de son orbite apparente qui se fait dans le sens

forme son année, un peu moindre, comme on voit, que les deux tiers d'une année de la Terre. L'orbite de Vénus est la moins excentrique des orbites planétaires, celle dont la forme se rapproche le plus d'un cercle parfait. Voici, en effet, quelles sont les distances moyenne et extrêmes de Vénus au Soleil, exprimées en prenant pour unité la distance moyenne du Soleil à la Terre et converties en kilomètres :

Distance	aphélie.	0.72828	107 700 000 kil.
—	moyenne.	0.72333	107 000 000 —
—	périhélie.	0.71838	106 300 000 —

Connaissant l'excentricité (0.00684331) et le demi-grand axe, ou la distance moyenne, on calcule aisément le développement de l'orbite de Vénus, qu'on trouve mesurer 672 millions de kilomètres, ou 168 millions de lieues. La vitesse moyenne de la planète est donc de près de 3 millions de kilomètres par jour, ou de $34^{k}.6$ par seconde[1].

Donnons encore un élément de l'orbite de Vénus. Son plan ne coïncide pas avec celui de l'orbite terrestre; l'angle d'inclinaison est de $3°23'35''$.

Un mot maintenant des distances de Vénus à la Terre. Ces distances varient considérablement, selon les positions des deux planètes sur leurs orbites respectives. Quand Vénus est à sa conjonction inférieure, elle est évidemment beaucoup plus rapprochée de la Terre qu'à sa conjonction supérieure, alors qu'elle se trouve située au delà du Soleil (fig. 82). La différence serait égale à tout un diamètre de l'orbite de Vé-

direct ou du mouvement du Soleil ; les 42 autres appartiennent à la portion de l'orbite la plus voisine de la Terre et constituent le mouvement rétrograde de Vénus. Ce changement de sens n'est qu'apparent ; c'est un simple effet de perspective dont on se rend compte très-facilement, quand on voit un objet se mouvoir circulairement autour d'un centre, et qu'on se meut soi-même plus lentement, mais en dehors de l'orbite parcourue par l'objet.

1. L'orbite de Vénus étant presque circulaire, la vitesse de la planète varie peu (de $34^{k}.4$ à $34^{k}.9$) dans le cours d'une de ses révolutions.

nus, si les plans des orbites coïncidaient. En se reportant à la figure 67 (page 224), où les courbes sont tracées avec leurs véritables grandeurs relatives et leurs excentricités, on se rendra un compte plus exact de ces variations de distance. Voici d'ailleurs les limites approchées entre lesquelles elles sont comprises. La distance maximum de Vénus à la Terre s'élève jusqu'à 1.740, en prenant toujours pour unité ou mètre astronomique la distance moyenne de la Terre au Soleil : c'est environ 257 000 000 de kilomètres; sa plus courte distance s'abaisse à 0.260, à peu près 40 000 000 de kilomètres. La différence est énorme, n'étant pas moindre, entre les distances extrêmes, de 217 millions de kilomètres ou, en nombres ronds, de 54 millions de lieues. Nous allons la voir se traduire par des différences correspondantes dans le diamètre sous lequel on voit Vénus dans les lunettes, et par suite dans l'éclat dont la planète brille à l'œil nu.

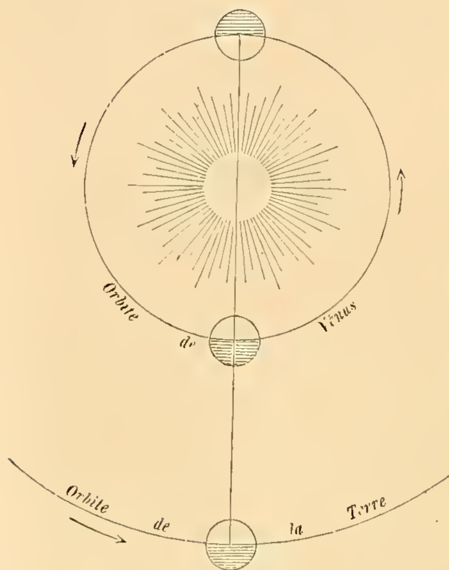


Fig. 82. Conjonction inférieure et conjonction supérieure de Vénus. Plus grande et plus petite distances à la Terre.

§ 2. VÉNUS VUE AU TÉLESCOPE; SES PHASES; SES DIMENSIONS.

Si, à l'époque où Vénus se dégage le soir des rayons solaires, après le coucher du Soleil, on se sert, pour observer la planète, d'une lunette même faiblement puissante, on la

voit sous la forme d'un disque lumineux, presque rond, qui de jour en jour s'aplatit vers l'Orient, en prenant des dimensions apparentes de plus en plus grandes. A son maximum de digression orientale, ce n'est plus qu'un demi-cercle lumineux semblable à la Lune au premier quartier ; puis elle prend la forme d'un croissant concave qui s'amincit à mesure que la planète se rapproche du Soleil, et jusqu'à ce qu'elle disparaisse dans ses rayons. Les phases passent par un ordre inverse quand on revoit Vénus, le matin, dans l'aurore. A sa plus grande digression occidentale, le croissant devient un demi-cercle ; mais à partir de ce point, la phase lumineuse s'agrandit encore, et le diamètre apparent de la planète diminue d'autant plus que son disque s'approche davantage de la forme circulaire.

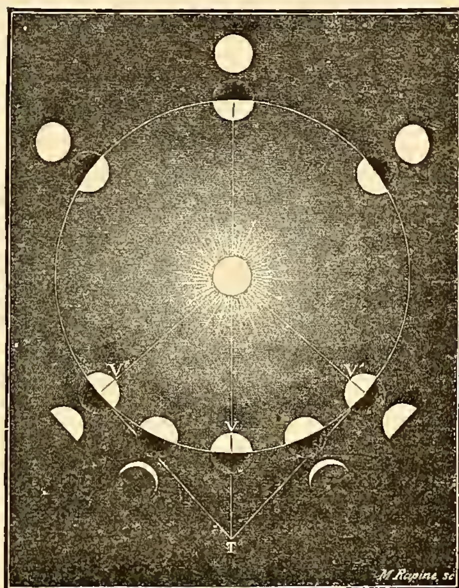


Fig. 83. Explication des phases de Vénus.

Ce sont, comme on voit, des phases absolument pareilles à celles de Mercure et qui s'expliquent de la même manière (fig. 83) : seulement, comme les variations de distance de Vénus à la Terre sont beaucoup plus considérables, les changements qui en résultent pour son diamètre apparent sont plus sensibles ; et comme Vénus s'éloigne plus à l'Orient et à l'Occident du Soleil que Mercure, ses phases sont pour cela d'une observation plus facile ; on les distingue avec les plus faibles lunettes. Aussi furent-elles reconnues, dès 1610, par Galilée, qui eut la joie d'y trouver une confirmation éclatante des vues de Copernic sur le système du monde, et la condamnation du

système de Ptolémée[1]. La figure 84 montre quelles sont les variations du diamètre apparent de Vénus, qui est de 16″.90 au moment où elle se trouve à sa moyenne distance de la Terre, ou à la distance 1; qui se réduit à 9″.5 quand Vénus est à son plus grand éloignement, et enfin atteint 63″ et

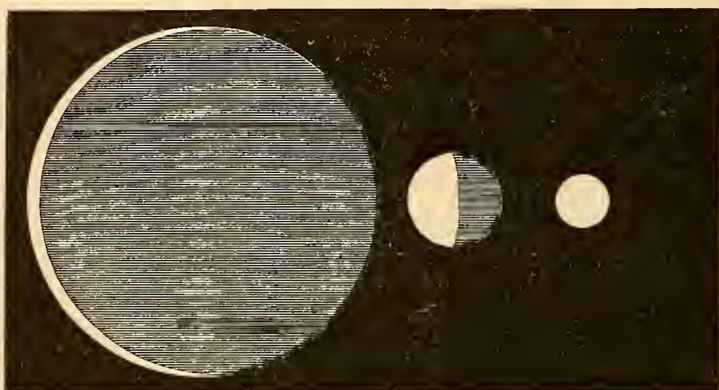


Fig. 84. Dimensions apparentes comparées du disque de Vénus, à ses distances moyenne et extrêmes de la Terre.

même 64″, quand la planète, à sa conjonction inférieure, se trouve à sa plus courte distance de la Terre[2].

Vénus, avons-nous dit, est quelquefois si brillante qu'elle devient visible en plein jour à l'œil nu : « J'en ai été témoin en 1750, dit Lalande, et tout Paris était alors dans l'étonnement : je trouve que la même chose arriva vers le 10 juillet 1716, le

1. D'après ce dernier système, l'orbite de Vénus enveloppait la Terre immobile au centre du monde, et se trouvait comprise entre celle de Mercure et celle du Soleil. Vénus ne pouvait donc jamais se trouver au delà du Soleil, ni dès lors tourner vers la Terre son hémisphère éclairé, ce qui est en contradiction avec l'observation de la phase ronde à l'époque de la conjonction supérieure.

2. La mesure du diamètre apparent de Vénus est rendue difficile par la vivacité de sa lumière, et par l'irradiation qui en est la conséquence. On effectue d'ordinaire cette mesure en évaluant au micromètre la distance des cornes du croissant, ou par le passage du disque au méridien, ou encore, mais alors fort rarement, en observant Vénus au moment d'un de ses passages. Voici

peuple de Londres regardait cela comme un prodige, au rapport de M. Halley. » Arago cite, d'après Bouvard, une observation du même genre, faite à Paris en plein midi, à l'époque du Directoire. Les circonstances favorables à cette visibilité dépendent à la fois de la phase de Vénus qui, combinée avec les variations du diamètre apparent, donnent à la surface illuminée des dimensions apparentes plus ou moins grandes, puis de l'élongation de la planète ou de sa distance au Soleil, enfin de l'état de pureté de notre atmosphère[1].

A la distance 1, le diamètre apparent de Vénus est 16″.9, tan-

quelques-unes des déterminations du diamètre apparent ramené à la distance 1 :

Lalande, 1762	16″.50	Stone (méridien).	16″.944
Airy (méridien).	16″.566	Beer et Mædler, 1836. . .	17″.14
Encke (passage de 1769).	16″.610	Plummer (micromètre). .	17″.322
Arago (micromètre)	16″.90	Main (micromètre)	17″.550
Tennant (passage de 1874)	16″.903	W. Herschel, 1792.	18″.79

La moyenne de tous ces résultats donne 17″.12, à peu de chose près le nombre trouvé par Beer et Mædler; mais si l'on élimine le résultat d'Herschel, évidemment trop fort, on tombe sur 16″.94, c'est-à-dire sur les déterminations d'Arago et de Stone, ou sur celle de Tennant, la plus récente de toutes.



Fig. 85. Phase de plus grande visibilité de Vénus.

1. En ne tenant compte que des premières de ces conditions, Halley a résolu ce problème : Trouver la situation de Vénus par rapport à la Terre, où la quantité de lumière qu'elle réfléchit vers nous est la plus grande. L'illustre géomètre et astronome a trouvé qu'il en est ainsi, non pas quand la digression orientale ou occidentale de la planète est maximum, mais quand elle atteint environ 39° 1/2 : alors Vénus (fig. 85) se montre dans les lunettes avec le quart de son disque illuminé, comme il arrive pour la Lune à son cinquième jour. Selon Lalande, les époques de plus grande visibilité de Vénus doivent revenir à peu près tous les huit ans, puisque la planète, au bout de ce temps, se retrouve alors dans la même situation relativement à la Terre, ou du moins dans une situation peu différente.

dis que celui de la Terre serait 17″.8. On voit donc que Vénus a des dimensions un peu inférieures à celles de notre globe. Voici les nombres que donne le calcul, quand on prend pour unités les dimensions correspondantes de la Terre; les nombres de la seconde colonne indiquent les rapports des dimensions du Soleil aux dimensions de Vénus :

Diamètre de Vénus.	0.954	113 .82
Surface —	0.910	12 950
Volume —	0.868	1 473 800

Le diamètre de Vénus mesure donc 12 000 kilomètres en nombres ronds, et la circonférence de son globe offre un dé-

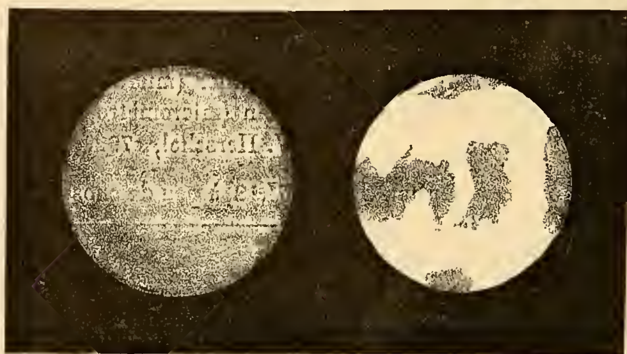


Fig. 86. Vénus et la Terre; dimensions comparées.

veloppement de 38 000 kilomètres, environ 9500 lieues. C'est de toutes les planètes connues, celle dont les dimensions approchent le plus des dimensions du globe terrestre.

Comme Mercure, Vénus passe sur le Soleil à certaines de ses conjonctions inférieures; mais ces passages, beaucoup plus importants, sont aussi beaucoup plus rares. Nous donnerons plus loin (voy. la Troisième partie) des détails sur les passages antérieurs de Vénus, et sur ceux de 1874 et de 1882, dont le premier a été observé en un grand nombre de stations. Rappelons seulement ici que, malgré l'irradiation qui fait paraître plus petit le disque noir de Vénus sur le Soleil, c'est une cir-

constance favorable à la mesure de son diamètre et à l'étude de la forme rigoureuse du disque. Jusqu'ici, on n'avait pu constater aucune trace d'aplatissement; mais pendant le dernier passage, celui du 8 décembre 1874, un astronome anglais, le lieutenant-colonel Tennant, a constaté l'inégalité de deux rayons de la planète qui, ramenés à la distance unité, seraient égaux, le plus grand à 8″.4633, le plus petit à 8″.4308; la différence 0″.0325 indiquerait un aplatissement d'au moins $\frac{1}{260}$, nombre plus fort que celui qui mesure l'aplatissement du globe terrestre.

§ 3. CONSTITUTION PHYSIQUE ET MÉTÉOROLOGIE.

En observant Vénus dans ses positions les plus favorables, Dominique Cassini est parvenu, en 1666 et 1667, à reconnaître quelques taches obscures sur son disque ; une tache brillante voisine de la ligne de séparation de la lumière et de l'ombre, étudiée par lui avec soin, lui fit reconnaître le mouvement de rotation de la planète, dont la durée lui parut être d'environ 23 heures et 20 minutes[1]. Des observations ulté-

1. Cassini n'a pu s'assurer si le mouvement était une rotation : « En moins d'un jour, dit-il, la tache achève son mouvement soit de rotation, soit de révolution, soit de libration ; de manière qu'en 23 jours à peu près, elle revient environ à la même heure, à la même situation dans la planète de Vénus : ce qui ne se fait pas néanmoins sans quelque irrégularité. »

Soixante ans plus tard, en 1726, l'astronome romain Bianchini observa sur le disque une série de taches obscures, et de l'étude de leurs mouvements il crut pouvoir assigner à la rotation de Vénus une durée de 24 jours 8 heures. Mais J. Cassini, fils de Dominique, en discutant et comparant les observations de son père et celles de Bianchini, prouva que l'énorme différence des deux résultats provenait de ce que ce dernier savant avait observé la même tache, revenue à une position identique après une période de 25 rotations entières, ce qui donne 23 heures 22 minutes pour la durée de l'une d'elles, nombre presque pareil à celui de D. Cassini. Les observations de Vico, de 1840 à 1842, ont d'ailleurs levé à cet égard tous les doutes.

rieures dues à Schrœter (1788-1793), et notamment celles de l'astronome romain Vico (1840-1842), ont permis de déterminer avec plus de précision encore cette durée, qui est de 23 heures 21 minutes et 22 secondes, c'est-à-dire de 34 minutes et

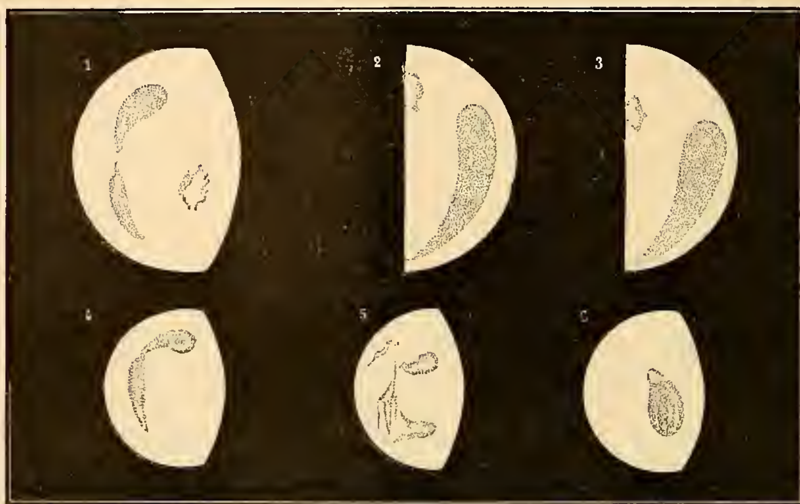


Fig. 87. Taches obscures et taches brillantes de Vénus. — 1, 2, 3, taches observées par D. Cassini en 1666 et 1667[1]. — 4, 5, 6, taches observées par M. Langdon en 1871.

42 secondes moins longue que celle de la rotation de la Terre (0.977 du jour sidéral terrestre).

Telle est la durée du jour sidéral de Vénus; l'année de la planète se compose donc de 231 rotations et par conséquent d'environ 230 jours solaires. Le jour solaire moyen de Vénus

1. Le dessin n° 1 donne, d'après Cassini, l'aspect de Vénus le 14 octobre 1666 à $5^h 45^m$ du soir; on y voit deux taches sombres allongées et réunies par leurs pointes, et une petite tache brillante non loin du centre. Les n°s 2 et 3 se rapportent à l'observation du 28 avril 1667; le premier montre l'aspect du croissant un quart d'heure avant le lever du Soleil; le second le donne au moment même du lever. Le déplacement sensible des taches est le fait qui a servi à l'illustre astronome pour reconnaître et déterminer le mouvement.

Les dessins 4, 5 et 6, faits à deux cent quatre ans d'intervalle, nous ont paru intéressants à comparer à ceux de Cassini, à cause de la similitude de forme des taches obscures.

se trouve ainsi égal à 23 heures 27 minutes et 6 secondes, plus long de 5 minutes et 42 secondes que son jour sidéral. La vitesse de rotation d'un point de l'équateur atteint 452 mètres par seconde, à très-peu de chose égale à la vitesse d'un point de l'équateur de la Terre. Comme les autres éléments physiques, la masse, la densité diffèrent aussi très-peu des

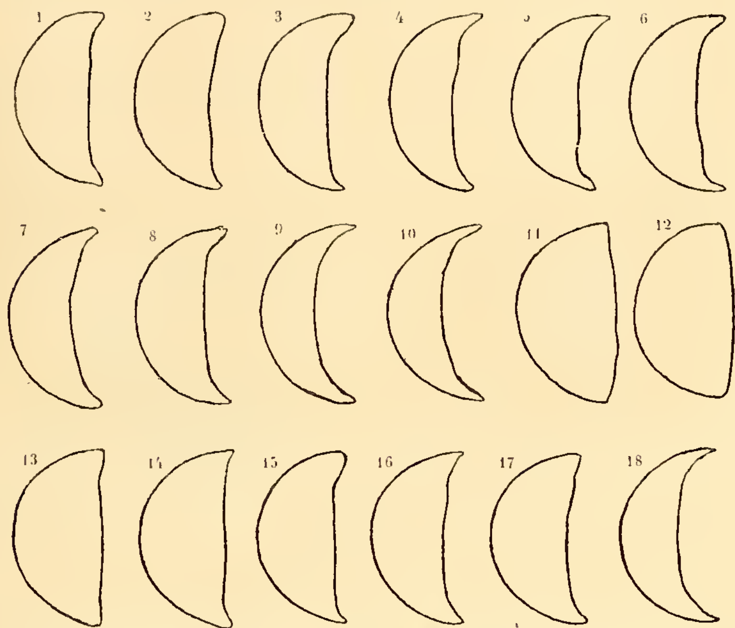


Fig. 88. Observations du croissant de Vénus, faites en mars 1833, et d'avril à octobre 1836, par Mædler[1].

mêmes éléments terrestres, on peut en conclure, par analogie, que l'aplatissement du globe de Vénus dû à la rotation doit être à peu près égal à celui de notre planète; les mesures que nous avons citées plus haut, mais qui ont besoin d'être confirmées, font cet aplatissement un peu plus fort.

1. Dans la série de dessins du croissant de Vénus que représente la figure 88, il faut remarquer principalement : 1 et 3, correspondant au 21 mars à $7^h\ 29^m$ et au 25 mars à $5^h\ 14^m$ (4 périodes à $23^h\ 24^m$). La comparaison des diverses apparences et de leurs dates, donne une rapidité dans les variations qui, selon Mædler, « est incompatible avec la période de Bianchini et parle au contraire en faveur de la période de Cassini. »

Mais sous d'autres rapports, par exemple en ce qui regarde la météorologie astronomique, Vénus doit différer notablement de la Terre. Le jour sidéral et le jour solaire y ont, il est vrai, à peu de chose près la même durée que les nôtres; mais leur distribution suivant les latitudes, leurs inégalités dans le cours d'une révolution ou d'une année de Vénus, sont loin de suivre les lois qui caractérisent les climats terrestres. En effet, l'inclinaison du plan de l'équateur sur celui de l'orbite atteint, d'après les mesures de Vico, près de 50° (49° 48′), au lieu du nombre 23° 27′ qui sur la Terre mesure l'obliquité de l'écliptique; l'axe de rotation fait donc un angle de 40° 12′ avec le même plan. Le nœud de l'équateur a une longitude de 56° 30′. Ces éléments permettent de préciser l'ordre et la durée des saisons, et aussi la distribution des climats. Ainsi, pour un point de l'hémisphère nord de la planète, les saisons estivales, printemps et été, sont les plus courtes, et le solstice d'été se trouve voisin du périhélie. Le contraire a lieu naturellement pour l'hémisphère austral. Mais l'orbite de Vénus étant peu excentrique, les distances au Soleil varient peu, et il y a peu de différence dans la durée relative des saisons estivales et des saisons hivernales. Ces durées varient entre 54 et 56 jours. Les radiations solaires, calorifiques et lumineuses conservent aussi durant toute l'année une intensité presque constante, à peu près double (1.910), nous l'avons vu[1], des radiations solaires sur la Terre. Au périhélie, cette intensité ne dépasse celle de l'aphélie que de 0.028.

1. Vu de Vénus, à sa moyenne distance, le Soleil a un diamètre apparent de 44′20″, plus d'une fois et un tiers celui sous lequel on le voit de la Terre. Les surfaces apparentes du disque solaire, et, dès lors, les intensités de la lumière et de la chaleur rayonnées par le Soleil sur Vénus et sur la Terre, sont donc entre elles dans le rapport des nombres 191 à 100. Mais si l'on tient compte des dimensions des hémisphères des deux planètes qui reçoivent ces radiations, on trouve que les quantités totales de lumière ou de chaleur reçues simultanément par Vénus et par la Terre, sont comme les nombres 182 et 100. La différence entre ces deux rapports est peu sensible.

Il y aurait donc des variations météorologiques presque insensibles sur Vénus, sans cette circonstance de la forte obliquité de son équateur sur le plan de l'orbite. Mais il est aisé de se rendre compte de l'influence considérable de cette inclinaison, soit sur la longueur relative des jours et des nuits pendant le cours de l'année, en un point quelconque de la surface de la planète, soit sur leurs variations selon la latitude.

A l'équateur de Vénus, le jour est égal à la nuit pendant les 230 jours de l'année; mais là, le Soleil, qui s'élève au zénith

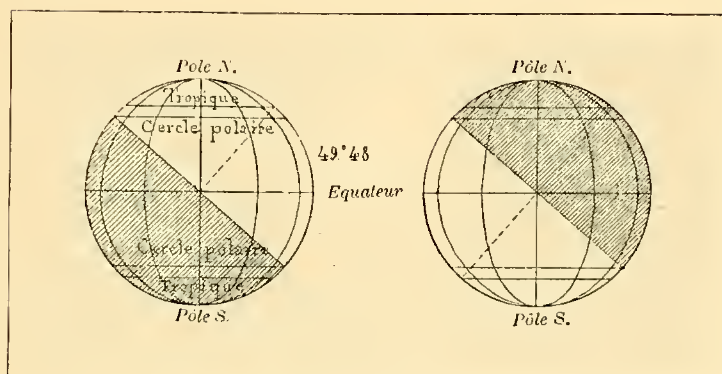


Fig. 89. Les jours et les nuits sur Vénus, à l'époque des solstices.

à chaque équinoxe, s'y abaisse jusqu'à 40° de l'horizon, aux jours des solstices. Les zones polaires et les zones tropicales y existent seules et s'y confondent entre les latitudes de 40° et de 50°. Pour donner un exemple des variations que subissent les durées relatives des jours et des nuits et les alternatives de chaleur et de froid qui en sont nécessairement la conséquence, considérons les régions situées sur Vénus à une latitude de 45°, à égale distance de l'équateur et du pôle. A partir de l'équinoxe du printemps, le Soleil, qui à cette époque s'élève à 45° à midi, monte chaque jour de plus en plus haut au méridien et finit par atteindre le zénith. Alors commence une période de jours semblables à celle des jours de notre zone polaire :

le Soleil ne se couche plus ; toutes les 23 heures 21 minutes, il décrit un cercle autour du pôle céleste, cercle qui diminue de plus en plus, jusqu'à n'avoir plus, à l'époque du solstice d'été, qu'un rayon de 40° 12′, correspondant à une hauteur méridienne de 85° ; puis il revient sur ses pas, repassant par les mêmes positions sans se coucher, jusqu'à ce qu'il se trouve une seconde fois au zénith. Viennent alors des nuits d'abord fort courtes, puis peu à peu croissant en durée jusqu'à l'autre équinoxe. Voilà pour les saisons estivales. En automne et en hiver, même évolution du Soleil, mais en sens inverse. Les

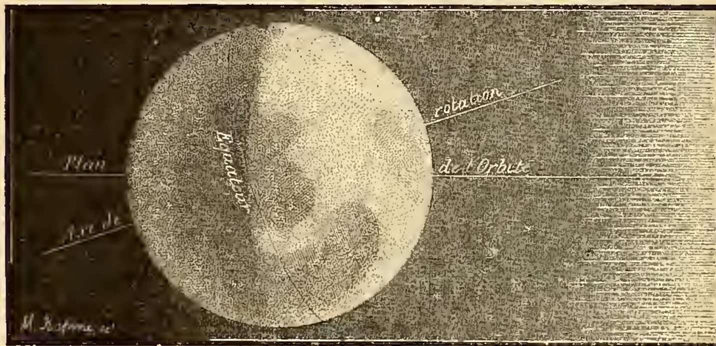


Fig. 90. Vénus à l'un de ses solstices ; hypothèse de l'inclinaison de l'axe de rotation, de 15°, d'après Schrœter.

nuits y surpassent de plus en plus les jours, et une époque arrive où le Soleil, de plus en plus bas sur l'horizon à midi, se cache au-dessous, pour ne plus reparaître pendant toute une période analogue à celle des nuits de nos zones polaires. A l'équateur, la plus grande hauteur méridienne du Soleil aux solstices est d'environ 40 degrés, tandis qu'il s'y élève au zénith à chaque équinoxe. Aux deux pôles, règne alternativement, pendant 115 jours de Vénus, une nuit ou un jour perpétuel : pendant la durée de ce long jour, le Soleil monte sans cesse sur l'horizon et finit par atteindre une hauteur de 50 degrés. Ces aperçus suffisent pour donner une idée de la distribution des climats astronomiques de la planète, et de la

succession singulière du jour ou de la nuit, des saisons ou des températures.

Schrœter, il est vrai, avait trouvé 75 degrés au lieu de 50°, pour l'inclinaison de l'équateur de Vénus sur son orbite. En adoptant ce nombre, qui diffère beaucoup de celui de Vico, les variations que nous venons de décrire seraient encore plus considérables; mais, dans l'une ou l'autre hypothèse, elles offrent ce caractère particulier, que les zones tropicales et les climats polaires empiètent les uns sur les autres : comme Mercure, Vénus n'a pas de zones tempérées.

Peut-être qu'une atmosphère nuageuse très-dense, constamment chargée des vapeurs qu'engendre la chaleur même, enveloppe le globe de Vénus, et tempère ainsi la rigueur de ses saisons opposées. Ce qui donne à cette hypothèse un certain degré de vraisemblance, c'est l'observation du passage de Vénus sur le Soleil en 1761. Un anneau nébuleux parut environner le disque noir de l'astre. En outre, au moment où ce disque était en partie sur le Soleil, en partie au dehors, le contour de l'arc extérieur se montra bordé d'un anneau lumineux. Pendant le passage de 1874, plusieurs observateurs, notamment MM. Janssen, Mouchez, Hérault, Bonifay et Watson, ont vu le disque de Vénus, soit avant son entrée, soit après le premier contact, entouré d'une auréole lumineuse. La planète se projetant alors sur le fond lumineux de la couronne, devenait visible par un effet naturel de contraste. Mais, outre cet effet, il paraît probable que l'atmosphère de Vénus a joué un rôle dans cette apparence : ce qui semble le démontrer, c'est qu'un peu avant le second contact, une mince bande brillante reliant les deux cornes du croissant solaire a été observée, et considérée par les observateurs, comme due à l'illumination de l'atmosphère de la planète[1]. Ce dernier phéno-

1. M. Fleuriais, chef de la mission française envoyée à Pékin pour observer le passage de Vénus du 9 décembre 1874, et M. Watson, astronome américain qui observait à la même station, ont été témoins d'un phénomène,

mène et celui de l'anneau obscur s'expliquent aisément, si le globe de Vénus est enveloppé d'une atmosphère très-épaisse; mais on va voir qu'il y a d'autres témoignages de l'existence de cette atmosphère.

Vers l'époque des conjonctions inférieures, Vénus se montre sous la forme d'un croissant très-mince, dont les cornes ont paru à divers observateurs dépasser notablement la demi-circonférence (fig. 91). Schrœter, qui aperçut le premier ce fait, en conclut qu'il prouve l'existence d'une atmosphère autour de la planète, et que la visibilité du croissant au delà de l'hémisphère directement éclairé par le Soleil, est due à une diffusion lumineuse analogue à celle qui produit sur la Terre la lumière crépusculaire. En mai 1857, le P. Secchi a observé le même phénomène qu'il interprète de la même manière. Vénus aurait donc des crépuscules et des aurores, dont la durée correspondrait, d'après ces deux astronomes, à un abaissement du Soleil de 15° à 20° au-dessous de l'horizon de la planète. C'est probablement à la même cause qu'il faut attribuer la dégradation très-marquée de lumière qu'on aperçoit dans les phases de Vénus, sur les limites de la ligne de séparation de la lumière et de l'ombre. A la vérité, comme nous l'avons déjà fait observer en parlant de Mercure, cette dégradation

qu'ils attribuent l'un et l'autre à l'atmosphère de la planète. Un peu avant l'instant du 3me contact, l'intervalle lumineux qui séparait les bords de Vénus et du Soleil, a paru d'abord interrompu par des franges mobiles, par des ombres tremblotantes, puis recouvert d'une teinte grise uniforme, comme si un milieu absorbant était interposé en cette région. Ce phénomène paraît évidemment dû à l'atmosphère de la planète, et M. Watson qui a cherché à en calculer l'épaisseur, d'après cette observation, l'évalue à la 70me partie du rayon de Vénus, c'est-à-dire à 88 kilomètres environ.

Nous avons sous les yeux et nous reproduirons plus loin une épreuve photographique du passage, obtenue à Kobé, et que nous devons à l'obligeance de M. Janssen; sur cette épreuve, on aperçoit une auréole faiblement lumineuse autour du disque noir de Vénus. Si cette auréole, comme il paraît probable, est due à l'atmosphère de la planète, les observations analogues faites sur Mercure (voir la figure 80) légitimeraient une conclusion pareille.

de teinte peut être occasionnée en partie par l'obliquité des rayons solaires, à leur arrivée sur le sol, dans les points où le Soleil est très-bas sur l'horizon, en partie par les ombres que les aspérités du sol projettent très-longues vers le lever ou le coucher de l'astre. De telles aspérités existent à la surface de Vénus, si l'on s'en rapporte aux échancrures de son

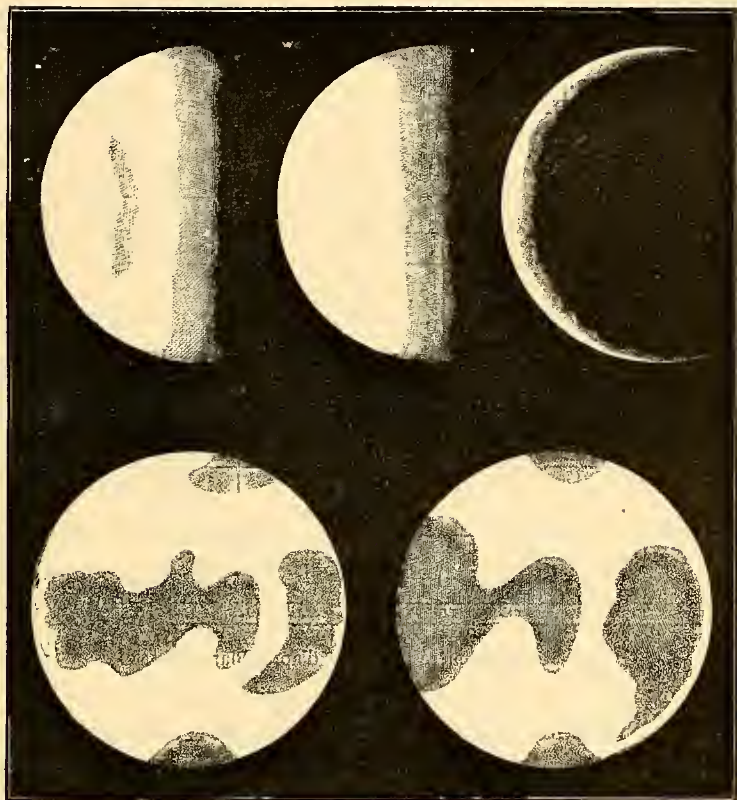


Fig. 91. Échancrures du croissant de Vénus, d'après Schrœter.
Taches des deux hémisphères, d'après Bianchini.

disque, observées par Lahire, Derham, Schrœter, et aux dessins qu'en a laissés ce dernier, dessins dont trois se trouvent reproduits dans la figure 91. En d'autres circonstances, les cornes du croissant ont paru tronquées, et même un point lumineux a été aperçu en dehors de la portion continue du disque éclairé. Maintenant, les mesures de hauteur que Schrœter

a calculées d'après ses observations, pour les montagnes de Vénus, ne sont-elles point exagérées? Est-il vrai que les aspérités du sol de la planète atteignent jusqu'à 44 kilomètres de hauteur verticale? Évidemment, il n'y aurait rien là d'impossible : mais les particularités physiques d'où l'on a tiré ces mesures sont d'une observation si difficile, il y a tant d'incertitude encore sur leur réalité[1], qu'il n'est pas permis d'affirmer, ni de nier. Il faut attendre la consécration d'observations nouvelles.

Les taches sombres que Cassini a le premier remarquées sur

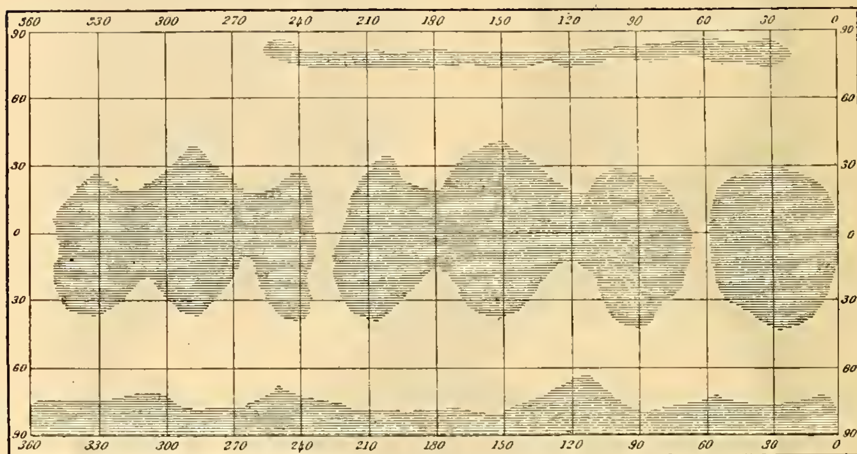


Fig. 92. Planisphère de Vénus, d'après Bianchini.

le disque de Vénus, mais qui lui ont paru très-fugitives, que Bianchini a pu dessiner avec plus de précision, paraissent avoir été revues un siècle après, avec les mêmes formes par Vico : ce sont celles qu'on voit représentées dans le planisphère dressé par Bianchini (fig. 92) et dans les deux disques

1. Le savant et regretté J. Chacornac m'écrivait en 1865 : « Je n'ai jamais rien aperçu des taches ni des troncatures des cornes (de Mercure et de Vénus), même avec le 80 centimètres. Je ne connais aucune observation datant des grandes puissances optiques des lunettes récentes, qui aient constaté le fait de la troncature : on est réellement étonné de tout ce qu'a vu avec les lunettes de son époque, le célèbre Schrœter. »

entièrement éclairés de la figure 91. Ce seraient donc des taches permanentes, non des parties vaporeuses de l'atmosphère : peut-être sont-ce les continents et les mers de Vénus, si toutefois cette division du sol se retrouve sur cette planète, comme sur la nôtre.

L'analyse spectrale n'a rien indiqué de positif à M. W. Huggins sur l'existence d'une atmosphère autour de Vénus. Le P. Secchi paraît avoir été plus heureux : il signale, dans le spectre de sa lumière, l'existence de raies analogues aux raies de la vapeur d'eau de l'atmosphère terrestre; et il en conclut naturellement non-seulement la réalité d'une atmosphère, mais l'analogie de composition qu'elle offre avec la nôtre.

Quand Vénus est voisine de sa conjonction inférieure, son disque se voit quelquefois tout entier, bien que le croissant lumineux soit très-mince : la partie obscure apparaît comme éclairée par une lumière secondaire, semblable à la lumière cendrée de la Lune. Arago rapporte plusieurs observations de ce fait, depuis celle de Derham (publiée en 1729) jusqu'à celle de Gruithuysen en 1825. A Leipzig, le 20 avril 1865, la lumière secondaire de Vénus a été vue très-distinctement, ayant une teinte gris verdâtre, plus claire que le fond du ciel. Quelle est la cause de cette illumination nocturne? Un phénomène de phosphorescence du sol de Vénus, le reflet des lumières stellaires, de la lumière zodiacale, un effet de diffraction dans son atmosphère, ou enfin la lumière d'aurores magnétiques pareilles à nos aurores polaires? On ne sait : mais toutes ces hypothèses ont été proposées pour expliquer le fait en question.

Par diverses méthodes, la masse de Vénus a été calculée, et la moyenne des déterminations fait voir qu'elle est environ la 400 000e partie de la masse du Soleil, ou les 8/10 de la masse terrestre : d'après M. Le Verrier, elle est $\frac{1}{412150}$, celle du Soleil étant 1, ou 0.787, si la masse de la Terre est prise pour unité. La densité moyenne, comparée à celle de la Terre, serait alors

0.905; ou 5.1, en la rapportant à la densité de l'eau. Cela indiquerait pour le globe de Vénus, une composition minérale presque identique à celle de notre globe. D'autre part, l'intensité de la pesanteur à la surface, y est 0.864, de sorte qu'un corps qui tombe à la surface, sous la seule influence de la gravité, y parcourt $4^{m}.414$ pendant la première seconde. Les corps, sur Vénus, pèsent, comme on voit, un peu moins que sur la Terre : la différence est de 1/7 à peu près.

En résumé, la planète que nous venons d'explorer se rapproche beaucoup, par ses dimensions et plusieurs éléments de sa constitution astronomique et physique, de celle que nous habitons, mais elle n'en diffère pas moins peut-être sous plusieurs autres rapports. Les données positives sont trop peu nombreuses pour qu'il soit possible de se prononcer en connaissance de cause sur ce qui l'emporte, des ressemblances ou des différences signalées entre Vénus et la Terre. C'est à la science de l'avenir qu'il faut renvoyer la décision [1].

1. Si l'on s'en rapportait à un assez grand nombre d'observations de savants du dix-septième et du dix-huitième siècle (de Cassini, Short, Montaigne, Rœdkier, Horrebon, Montbarron, Lambert), Vénus aurait eu encore avec nous un trait de ressemblance de plus. Comme la Lune accompagne la Terre, Vénus serait aussi pourvue d'un satellite. Mais on n'a pu revoir ce corps singulier, et de hautes autorités scientifiques (De Lalande, *Encyclopédie méthodique*) ont assuré que les observateurs avaient été le jouet d'une illusion d'optique. A la vérité, aucun astronome ne croit plus aujourd'hui à cette existence.

III

LA TERRE ♁.

§ 1. FORME SPHÉROÏDALE DE LA TERRE ; SON ISOLEMENT DANS L'ESPACE.

Tout le monde, aujourd'hui, sait que la Terre est une planète, qu'elle a la forme d'un globe, isolé de toutes parts au sein de l'éther céleste, qu'elle est douée d'un double mouvement, mouvement de rotation diurne autour d'un de ses diamètres, mouvement annuel de translation dans l'espace ou de circulation autour du Soleil. Mais tout le monde ne se rend pas compte des raisons qui ont amené les savants à reconnaître ce grand fait, cette vérité si longtemps méconnue, de la réalité des mouvements du globe que nous habitons. Il importe donc, non de donner une démonstration en règle que tous les traités de cosmographie renferment d'ailleurs, mais de rappeler au moins les diverses preuves de raisonnement, d'observation et d'expérience, qui ont fait triompher les théories de Copernic et de Galilée.

Un mot auparavant de la forme de la Terre et de son isolement dans l'espace.

Quand on examine l'horizon, dans les pays de plaine, on reconnaît qu'il a la forme d'un cercle entourant l'observateur. Si ce dernier se déplace, le cercle se déplace aussi, mais sa forme persiste et ne paraît se modifier que lorsque des mon-

tagnes, des obstacles d'une certaine hauteur viennent à borner la vue. En pleine mer, la forme circulaire de l'horizon est plus nette encore et ne change qu'auprès des côtes, dont le profil en vient rompre la régularité. Voilà déjà un premier aperçu sur la rondeur de la Terre, puisque la sphère est le seul

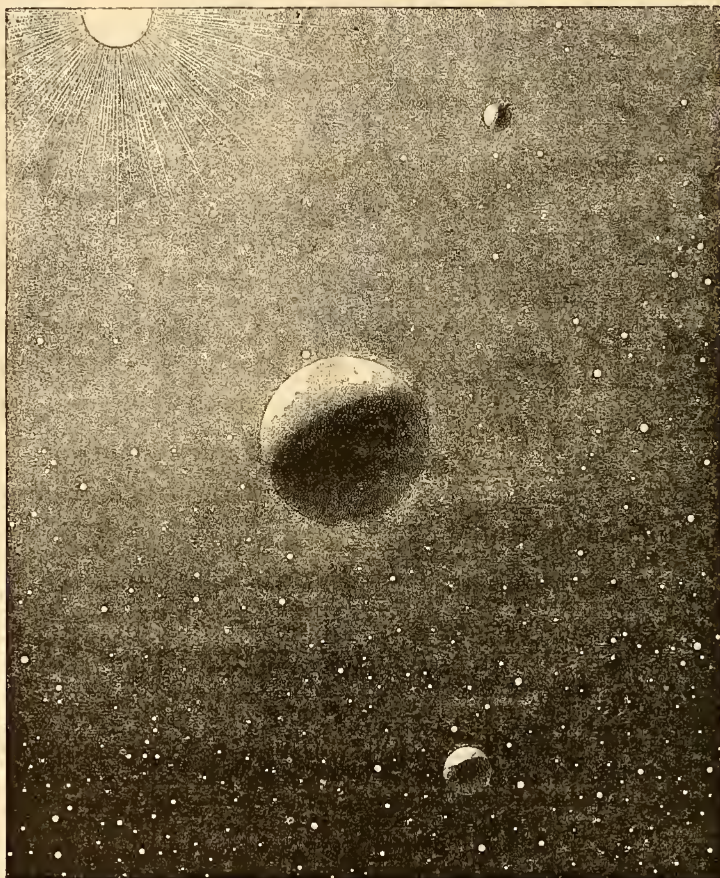


Fig. 93. Isolement de la Terre dans l'espace.

corps qui se présente toujours à nos yeux sous la forme d'un cercle, quel que soit le point de vue extérieur d'où on l'examine. D'ailleurs, on ne peut pas dire que l'horizon soit formé par la limite de la vue distincte, et que c'est là ce qui lui donne l'apparence d'une ligne circulaire, puisque le cercle

s'agrandit lorsqu'on s'élève verticalement au-dessus du sol de la plaine[1].

Jetez les yeux sur le dessin suivant (fig. 94), dans lequel une montagne est figurée au milieu d'une plaine dont la courbure uniforme appartient à une sphère. Du pied de la montagne, le spectateur n'aperçoit qu'un horizon très-limité, dont le rayon est *i k* par exemple. S'élève-t-il à mi-côte, en C, son

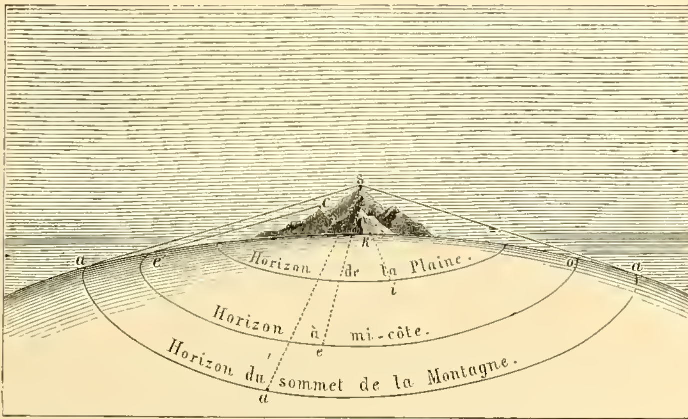


Fig. 94. Courbure des continents. Horizon d'un même lieu à diverses altitudes.

rayon visuel s'étend, plonge au-dessous du premier horizon et découvre un espace circulaire plus étendu, *o e d'*. Au sommet S

1. Quand nous disons que le cercle s'agrandit, il faut comprendre que l'étendue de la surface terrestre embrassée par l'œil, a un rayon réel de plus en plus considérable; des points d'abord masqués par la convexité de la Terre surgissent à mesure qu'on s'élève. Mais la dimension apparente du cercle de l'horizon, l'angle des rayons visuels aboutissant aux deux extrémités d'un diamètre de ce cercle, va au contraire en diminuant. C'est le phénomène connu sous le nom de *dépression de l'horizon*. Il résulte de là, qu'en s'élevant, on découvre aussi des portions de la voûte céleste qui seraient cachées pour un observateur posté au niveau du sol, et qu'on voit ainsi plus qu'un hémisphère du ciel. J. Herschel cite un fait curieux qui est dû à la dépression de l'horizon. Un aéronaute, nommé Sudler, étant parti en ballon de Dublin, descendit presque à la surface de la mer en approchant de la côte du pays de Galles. Le Soleil venait de se coucher. Sudler jeta du lest, remonta, et vit de nouveau le Soleil apparaître à l'horizon, comme si l'astre se levait à l'ouest. Enfin, descendant encore, l'aéronaute fut témoin d'un second coucher du Soleil.

de la montagne même, l'horizon *aaa* s'agrandit encore, et si l'atmosphère est pure, le spectateur verra de nombreux objets apparaître, là où, dans les stations inférieures, son regard ne rencontrait que l'azur du ciel. Cette extension de l'horizon serait inexplicable, si la Terre avait la forme d'un plan indéfini.

La courbure de la surface des mers se manifeste d'une fa-



Fig. 95. Courbure de la surface des mers. Visibilité ou disparition progressive des diverses parties d'un navire qui s'approche ou s'éloigne.

çon plus sensible encore. Supposez-vous placé sur la côte, au sommet d'une tour élevée, d'un monticule ou d'une falaise. Un navire apparaît à l'horizon : vous ne voyez d'abord que le haut des mâts, les voiles les plus élevées; les basses voiles et la coque sont invisibles. A mesure que le navire s'approche, ses parties inférieures sortent de derrière l'horizon, et bientôt il apparaît tout entier (fig. 95). Ce fait de l'apparition successive, à la surface de la mer, des diverses parties d'un objet

visible, en commençant par les plus élevées, se manifeste de la même façon pour les marins qui, du navire, observent la côte. L'explication en est rendue très-sensible dans le second croquis (fig. 96), où la marche du navire, vue de profil, est figurée sur la surface convexe de la mer.

Comme la courbure de l'Océan est la même dans toutes les



Fig. 96. Courbure des mers. Explication des divers aspects d'un navire vu de la côte.

directions, c'est que la Terre a vraiment la forme d'une sphère, ou du moins n'en diffère que très-peu.

Mentionnons encore deux preuves d'un autre ordre, qui, de même que les précédentes, sont plus intéressantes comme faits que comme éléments de conviction pour le lecteur. Qui pourrait en effet douter aujourd'hui de la rondeur de la Terre, de son isolement dans l'espace, après tant de voyages de circumnavigation[1] dans tous les sens, après le témoignage journalier du mouvement des astres, se couchant d'un côté à l'horizon pour reparaître au bout de vingt-quatre heures, au côté opposé? Voici néanmoins ces preuves.

1. Le premier voyage de circumnavigation a été effectué, comme on sait, par un célèbre navigateur portugais, Ferdinand Magellan. Le 20 septembre 1519, il s'embarqua sur l'Océan, d'un des ports de Portugal, et se dirigeant vers l'Occident, il parvint au continent américain récemment découvert. L'absence d'un passage qui lui permît de continuer sa route vers l'Occident, le détermina à côtoyer l'Amérique dans la direction du sud, à doubler son extrémité méridionale par le détroit qui porte son nom, et à poursuivre sa navigation vers l'ouest. Magellan traversa la mer du Sud, et mourut dans les Philippines, avant d'aborder aux îles Moluques; mais le navire qui le portait, continuant sa route, finit par entrer en Europe comme s'il venait de l'Orient, après avoir achevé le tour entier du globe terrestre. Depuis, des voyages semblables se sont effectués fréquemment, tant par terre que par mer, et la rondeur de la Terre ainsi que son complet isolement dans l'espace sont devenus des vérités familières à tous.

Une des étoiles de la partie boréale du ciel, l'étoile Polaire — dont nous reparlerons plus loin — reste à peu près immobile et à la même hauteur dans le ciel au-dessus de l'horizon d'un lieu déterminé. Or, quand on s'éloigne dans la direction du Midi, cette étoile s'abaisse peu à peu, tandis qu'elle s'élève au contraire de plus en plus, si l'on s'avance vers le Nord. C'est là un fait qui trouve son explication toute naturelle dans la convexité de la surface de la Terre. Voudrait-on considérer ce changement de hauteur comme le résultat d'un rapprochement ou d'un éloignement réel du voyageur, relativement à l'étoile observée? Quand on saura à quelles distances les étoiles se trouvent de la Terre, on comprendra que le déplacement de l'observateur est pour ainsi dire infiniment petit, comparé à la distance de la Polaire, et ne peut en aucune façon rendre compte du mouvement apparent de l'étoile.

D'ailleurs, si, au lieu de marcher du Nord au Sud, c'est de l'Est à l'Ouest que l'observateur se déplace, la Polaire paraîtra toujours au même point du ciel rapporté à l'horizon mobile, à la même hauteur au-dessus de cet horizon. Mais alors, c'est l'heure du lever et du coucher des étoiles qui variera, ainsi que cela doit être, si la courbure de la surface terrestre existe en tous sens, et si, comme on le sait d'ailleurs, notre globe effectue chaque jour une rotation entière autour d'un de ses diamètres.

Enfin, dans les éclipses de Lune, la forme de l'ombre de la Terre, à mesure qu'elle envahit et obscurcit le disque brillant de l'astre, est toujours celle d'un segment de cercle, autre preuve concluante de la rondeur de notre planète.

La Terre a donc la forme d'un globe à peu près sphérique, dont une moitié reçoit la lumière du Soleil, tandis que l'autre moitié est plongée dans l'ombre. Pour qui s'en éloignerait graduellement, elle apparaîtrait sous la forme d'un disque de plus en plus petit, mais aussi de plus en plus lumineux, — parce que la lumière du Soleil que réfléchirait vers l'ob-



Pralon, Lith Imp Fraillery.

LA TERRE

Vue dans l'espace, à l'époque du Solstice d'été.

servateur la partie éclairée de la Terre lui paraîtrait concentrée dans une surface de plus en plus petite (fig. 93). Le disque en outre présenterait des phases comme Mercure et Vénus, selon la position relative de la Terre, du spectateur et du Soleil.

A une distance égale à celle de la Lune, la Terre serait vue sous la forme d'un disque lumineux parsemé de taches, les unes brillantes marquant les continents, les autres plus sombres indiquant la place des mers; d'autres taches d'un blanc plus éblouissant figureraient les neiges et les glaces des pôles; mais outre ces taches permanentes, on en distinguerait de variables et de mobiles, produites par les masses nuageuses de l'atmosphère, et qui masqueraient fréquemment les contours des autres. A cette distance, le diamètre apparent du globe terrestre serait près de quatre fois celui de la Lune, de sorte que, vue dans son plein, c'est-à-dire en face de son hémisphère éclairé, la Terre aurait l'éclat de treize pleines lunes réunies[1]. A une distance environ quadruple de celle de notre satellite, le globe terrestre semblerait donc encore aussi gros que ce dernier. Mais à mesure que l'observateur s'éloignerait, peu à peu son diamètre diminuerait et finirait par devenir insensible. La Terre alors brillerait au ciel comme une étoile : elle aurait à l'œil nu l'aspect que nous voyons aux autres planètes, à Mercure ou à Vénus, à Mars, Jupiter ou Saturne.

1. Pour être tout à fait rigoureuse, cette assertion exigerait que le pouvoir réflecteur des diverses parties du globe terrestre fût le même que celui de la surface du sol lunaire, ce que nous ignorons. Il est probable que les terres, continents et îles, réfléchissent la lumière plus fortement que les eaux, qui en absorbent une proportion notable. Ainsi les mers doivent se montrer comme des taches grises ou bleuâtres, moins lumineuses que les continents. Mais ceux-ci, à leur tour, sont sans doute moins lumineux encore que certaines masses nuageuses dont la surface supérieure, comme le prouvent les voyages en ballon, réfléchit très-vivement la lumière du Soleil.

§ 2. FORME RÉELLE ET DIMENSIONS DU SPHÉROÏDE TERRESTRE.

Si les preuves que nous venons de passer en revue montrent avec évidence que la Terre a la forme d'une boule, elles sont insuffisantes pour déterminer rigoureusement cette forme. Est-ce une sphère parfaite — abstraction faite, bien entendu, des rugosités de la surface, montagnes, collines, etc.? — Ou bien, est-ce un autre solide géométrique et régulier, tel qu'un ellipsoïde de révolution, ou enfin un sphéroïde plus ou moins irrégulier? En outre, quelles sont ses véritables dimensions?

Pour résoudre ce double et intéressant problème, on a commencé par supposer la Terre parfaitement sphérique. Chaque méridien — ligne idéale tracée à la surface et enveloppant le globe en passant par les deux pôles — se trouvait alors être un cercle; dès lors, pour en avoir les dimensions totales, il suffisait d'en mesurer un arc qui fût une fraction connue du cercle, un arc d'*un degré* par exemple. Les anciens l'avaient tenté : ainsi, dès le troisième siècle avant J. C., Ératosthènes mesurait la différence de latitude de Sienne et d'Alexandrie, et, de la distance connue de ces deux villes, il concluait que la circonférence de la Terre était longue de 200 000 stades, environ 45 millions de mètres. Posidonius, Ptolémée trouvèrent des résultats un peu inférieurs. Dans les temps modernes, le médecin Fernel (1550) est le premier qui ait entrepris de mesurer la longueur d'un degré du méridien. Il munit d'un compteur l'une des roues de sa voiture, et ayant parcouru la distance qui sépare Amiens de Paris, il trouva 57 070 toises pour la longueur du degré.

Vers 1615, Snellius mesura un arc de méridien terrestre à l'aide de la méthode employée de nos jours. Cette méthode consiste à mesurer avec un grand soin une base, ou ligne tracée horizontalement sur le terrain, à regarder cette base

comme le côté d'un premier triangle dont on mesure les angles à l'aide d'un cercle gradué, et à construire successivement une série ou chaîne de triangles, tous reliés les uns aux autres dans la direction du méridien. Quand on connaît tous les éléments de ces triangles, on en déduit par le calcul les portions successives de la méridienne qui les traverse, et par suite la longueur totale de l'arc de méridien compris entre les stations extrêmes.

En 1769, Picard trouva 57 060 toises (le nombre de Fernel) pour la longueur du degré, en mesurant une suite de triangles compris entre Malvoisine et Amiens. Parmi les nombreuses mesures d'arc de méridien qui eurent lieu par la suite, citons celles de Bouguer, Lacondamine et Godin, qui mesurèrent au Pérou, près de l'équateur, un arc d'un degré, pendant qu'une expédition ayant Maupertuis à sa tête mesurait un autre degré en Laponie ; celles de Delambre et Méchain, qui calculèrent la longueur de la portion de la méridienne de Paris comprise entre Dunkerque et Barcelone. Arago et Biot prolongèrent ensuite cet arc jusqu'à Formentera, l'une des îles Baléares. Enfin de nombreux travaux du même genre ont été exécutés depuis et s'exécutent encore dans différentes contrées. La plupart de ces mesures s'accordent sur ce point :

Les divers degrés d'un même méridien ne sont pas d'égales longueurs ; la Terre n'est donc pas rigoureusement sphérique. De plus, ces diverses longueurs vont en croissant constamment de l'équateur aux pôles, ainsi qu'il résulte du tableau suivant, donnant les longueurs d'un arc d'un degré à diverses latitudes :

Lieux où les degrés ont été mesurés.	Latitudes.	Longueurs en mètres de l'arc d'un degré.
Pérou	1° 31′	110 582ᵐ
Bengale	12° 32′	110 631
Indes orientales . . .	22° 37′	110 668
France et Espagne. .	46° 8′	111 143
Angleterre.	52° 2′	111 224
Russie.	56° 25′	113 360
Laponie.	66° 20′	111 477

La conséquence de cet accroissement de longueur des degrés est que la Terre est aplatie vers les pôles[1], c'est-à-dire que les méridiens, au lieu d'être des circonférences de cercle, sont des courbes qui approchent beaucoup de la forme d'une ellipse, ainsi que l'indique la figure 97, l'aplatissement étant du reste ici très-exagéré. La ligne des pôles, ou l'axe de la Terre, est le plus petit diamètre commun à toutes ces ellipses méridiennes, et leurs plus grands diamètres forment les différents rayons du cercle de l'équateur. Disons maintenant quelles sont les dimensions du sphéroïde terrestre. Le rayon de l'équateur

1. Il importe de se mettre en garde ici contre l'opinion erronée que quelques auteurs non géomètres (Bernardin de Saint-Pierre par exemple) ont émise comme une conséquence de l'inégalité de longueur des degrés du méridien. Pour eux, la Terre doit être allongée aux pôles. La raison de cette erreur provient de ce qu'ils regardaient à tort les verticales successives comme concourant au centre, et alors ils en concluaient que le rayon de l'équateur

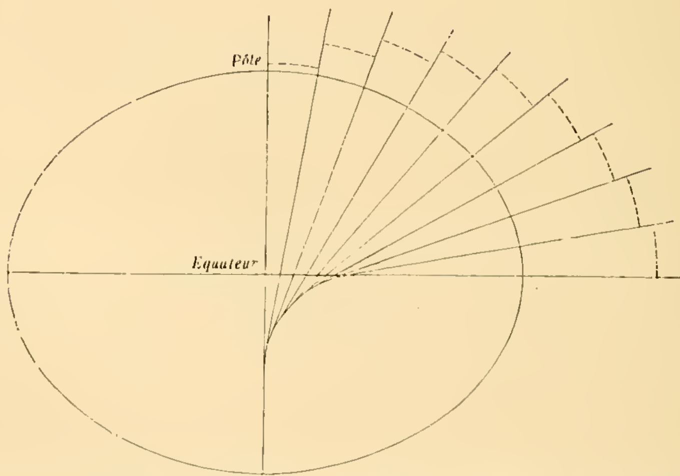


Fig. 97. Forme elliptique des méridiens terrestres. Accroissement de longueur des degrés, de l'équateur au pôle.

est inférieur à celui des pôles, puisque l'arc d'un degré s'y trouve plus petit. Mais la géométrie prouve au contraire, et la figure 97 en fait foi, que c'est près du grand diamètre de l'ellipse que la courbure est la plus prononcée, de sorte qu'il faut faire un moindre chemin sur les parties du méridien voisines de l'équateur, pour que les verticales s'écartent d'un degré, que sur les parties plus rapprochées du pôle.

est de 6377 kil. 4 selon Bessel et Airy, de 6378 kil. 2 selon l'*Annuaire du Bureau des longitudes*. Le rayon polaire mesure 6356 kil. 1 selon les premiers, 6356 kil. 6 d'après la dernière autorité. La dépression à chaque pôle est donc un peu plus de 21 kilomètres (21.3 ou 21.6), nombre qui mesure aussi l'épaisseur du bourrelet ou renflement équatorial.

C'est le rapport numérique entre la différence du rayon du pôle et du rayon de l'équateur d'une part, et ce dernier rayon d'autre part, qui constitue ce qu'on nomme l'*aplatissement* du sphéroïde terrestre. Si l'on adopte les nombres calculés par Airy et Bessel, on trouve $\frac{1}{299}$ pour l'aplatissement; on obtient un nombre un peu plus fort, égal à $\frac{1}{294}$, si l'on prend ceux du *Bureau des longitudes*. Telle est l'inégalité principale qui différencie le globe de la Terre d'une sphère parfaite. A la distance des planètes les plus voisines, cette inégalité échapperait sans doute aux mesures les plus délicates. Pour nous faire une idée exacte de ce qu'est l'aplatissement polaire, représentons-nous la Terre sous la forme d'un globe de 1 mètre de diamètre : la dépression de chaque pôle y sera de $1^{mm}.66$ seulement; il s'en faudra donc de $3^{mm}.33$ que le diamètre polaire égale le diamètre de l'équateur. L'œil aurait certainement de la peine à reconnaître, à plus forte raison à apprécier, une si faible différence relative.

Que deviennent, à cette échelle, les irrégularités produites par les montagnes et les vallées, que devient la saillie des continents au-dessus du niveau des mers? Le calcul est facile. Le Kanchinjinga et le Gaourichnaka, ces colosses de l'Himalaya, les plus hautes montagnes connues de notre globe (8582^{m} et 8840^{m} d'altitude), ne s'élèveraient sur une sphère de cette grosseur que des sept-dixièmes d'un millimètre; le Mont Blanc n'aurait guère plus d'un tiers de millimètre de hauteur; encore ne s'agit-il pas ici de la hauteur au-dessus de la région environnante, mais seulement au-dessus du niveau de l'Océan. Les chaînes de montagnes de hauteur moyenne,

les collines et les vallées seraient comme invisibles[1]. Les plus grandes profondeurs de l'Océan n'entameraient pas la surface de plus d'un millimètre, et l'enveloppe aérienne qui sous le nom d'atmosphère entoure notre globe ne formerait pas une couche de 30 millimètres de hauteur, si l'on adopte les évaluations les plus récentes. La figure 98 fait voir, sur une

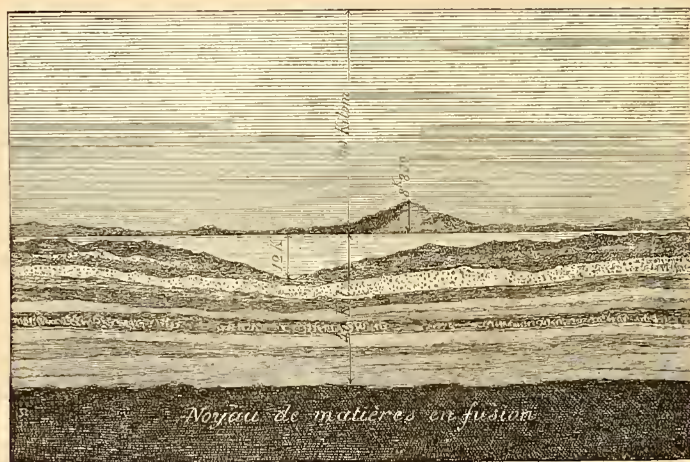


Fig. 98. Hauteurs comparées des plus hautes montagnes, des plus grandes profondeurs de la mer, de la croûte solide et de l'atmosphère terrestre.

plus grande échelle, les dimensions relatives de la hauteur des montagnes et de l'atmosphère, de la profondeur de l'O-

1. Si les continents étaient réduits à leur hauteur moyenne, c'est-à-dire si toute la matière solide qui, dans chacun d'eux, dépasse le niveau de la mer était uniformément répartie sur sa surface, voici quelles épaisseurs on leur trouverait :

Continent européen	205	mètres.
— asiatique	350	—
— de l'Amérique septentrionale	228	—
— de l'Amérique méridionale	345	—
— de l'Amérique entière	286	—

La profondeur moyenne de l'Océan serait bien plus considérable, elle atteindrait 4800 mètres. Sur notre globe de 1 mètre, le continent le plus élevé, l'Asie, aurait donc à peine 3 centièmes de millimètre.

céan et de l'épaisseur présumée de l'écorce terrestre[1]. Pour obtenir ces dimensions, il faudrait donner exactement au globe terrestre un diamètre de 12^m,75.

On a souvent comparé les inégalités de la surface de la Terre aux rugosités de la peau d'une orange. On peut voir, par les comparaisons qui précèdent, combien cette assimilation est grossière. Notre globe, réduit aux dimensions d'une orange, ne laisserait plus voir à l'œil nu aucune trace de saillies ni de dépressions; il n'offrirait plus aucun indice sensible de déformation ni d'aplatissement.

Des mesures géodésiques nombreuses ont permis de connaître d'autres inégalités de la forme de la Terre. Ainsi, on croit pouvoir assurer que les ellipses méridiennes ne sont pas toutes égales entre elles, ni toutes régulières, et il paraît aussi certain que l'aplatissement n'est pas le même à chaque pôle. En outre les divers parallèles, dont on a mesuré des arcs nombreux et étendus, au lieu d'être des cercles comme l'exigerait l'hypothèse d'un ellipsoïde de révolution, présentent d'assez fortes irrégularités. Il en est de même de l'équa-

1. La hauteur de l'atmosphère est loin d'être connue avec quelque exactitude. En se fondant sur les limites des phénomènes crépusculaires, on évaluait cette hauteur à 60 kilomètres environ. D'après M. Liais, elle serait beaucoup plus considérable et atteindrait 340 kilomètres (*Comptes rendus* de l'Académie des sciences, janvier 1859). L'inflammation des bolides à des hauteurs considérables au-dessus de la surface de la Terre, paraît confirmer cette extension de l'enveloppe gazeuse de notre planète.

Quant à l'épaisseur de l'écorce solide, évaluée à 40 kilomètres, c'est une simple conjecture déduite de la loi observée de l'accroissement de la température des couches du sol avec la profondeur. Des savants, tels que Hopkins, admettent pour cette épaisseur des nombres beaucoup plus grands; ils vont jusqu'à la supposer égale au quart du rayon terrestre. Des géologues enfin ne croient pas à l'existence actuelle d'un noyau fluide, mais seulement à la présence à certaines profondeurs de masses liquides qui se font jour dans les éruptions volcaniques. Ces questions ne sont pas du ressort de l'astronomie, qui n'a besoin pour ses théories, que de l'hypothèse de la fluidité primitive des masses qui forment aujourd'hui le globe terrestre et les autres globes planétaires.

teur, que nous avons jusqu'ici supposé de forme circulaire, et qui est lui-même elliptique. Son grand axe mesure 12 753 kil. 5, son petit axe 12 753 kil. 5; ce qui fait une différence de 3 kilomètres entre les deux diamètres, ou un aplatissement égal à $\frac{1}{4252}$, 14 fois moindre que l'aplatissement polaire [1].

Ainsi, en définitive, la forme réelle de la Terre paraît être plutôt celle d'un ellipsoïde irrégulier, à trois axes principaux d'inégales longueurs.

L'étude de la structure de la Terre, des configurations du sol, des cours d'eau et des mers, des phénomènes généraux de son atmosphère [2], de la constitution géologique de son écorce et de celle du noyau intérieur sous-jacent, présente le plus haut degré possible d'intérêt. Mais une telle étude sort du cadre d'un ouvrage ayant pour objet la description du ciel. Je ne ferai que rappeler l'opinion, aujourd'hui généralement admise, de la fluidité primitive de notre planète, parce que cette hypothèse trouve sa confirmation astronomique dans l'aplatissement mesuré par les géomètres. Il est en effet démontré par les lois de la mécanique qu'une masse fluide, animée d'un mouvement de rotation, tend à prendre la forme d'un sphéroïde ou d'un ellipsoïde de révolution, aplati aux extrémités mêmes de l'axe autour duquel s'effectue le mouvement. Parmi les planètes que nous avons à explorer, nous en trouverons plusieurs qui présentent, comme la Terre, une forme sphéroïdale, mais avec des aplatissements beaucoup

1. Voici la position des sommets des axes de l'ellipse équatoriale :

Sommets du grand axe.	12° 1′ Long. E. (Congo.) 192° 3′ Long. E. (Iles Sandwich.)
Sommets du petit axe.	102° Long. E. Archipel de la Sonde.) 78° Long. O. (Isthme de Panama.)

2. Renvoyons, pour le développement de ces divers sujets de géographie physique, au savant et éloquent ouvrage de M. Élisée Reclus, LA TERRE, *description des phénomènes de la vie du globe.*

plus considérables à leurs pôles. Or, leur mouvement de rotation est précisément beaucoup plus rapide.

Un mot encore, sur la forme et sur les dimensions de la Terre.

On se fera une idée de la courbure de la surface du globe sur une étendue limitée de pays, par les résultats suivants : un voyageur qui part d'un point donné et s'en éloigne, s'abaisse en réalité de plus en plus au-dessous de l'horizon de ce point. Quand il aura parcouru 111 kilomètres, longueur d'un degré, il se trouvera à 971 mètres au-dessous de l'horizon du point de départ, abstraction faite des différences de niveau provenant de la pente ou des inégalités du terrain. L'horizon de Paris, prolongé jusqu'à Marseille, planerait au-dessus de cette ville à une hauteur de plus de 30 000 mètres, ou de 7 lieues et demie. A la hauteur de l'Etna, du pic de Ténériffe, du Mauwna-Roa, l'œil peut voir une étendue de pays qui est la 4000e partie de toute la surface de la Terre. Biot et Gay-Lussac, dans leur ascension de 1800, en embrassaient $\frac{1}{1600}$; Tissandier, Sivel et Crocé-Spinelli, du point où ils se sont élevés en 1874, auraient pu voir $\frac{1}{1590}$ de la même surface, sans le funeste événement qui a terminé leur glorieuse et lamentable expédition.

En raison de l'aplatissement des pôles, la circonférence d'un méridien est plus courte que celle de l'équateur d'environ 67 kilomètres. La première mesure 40 003 414 mètres; la seconde, 40 070 376 mètres.

Il résulte des nombres qui précèdent, que la surface de la Terre entière est d'environ 510 millions de kilomètres carrés. Comme celle de la France (de la France d'avant la guerre, c'est-à-dire y compris nos chères provinces de Lorraine et d'Alsace) est de 54 millions d'hectares, elle n'est guère plus de la millième partie de la surface totale (environ la 940e partie). De cette immense étendue, les mers réunies embrassent plus des trois

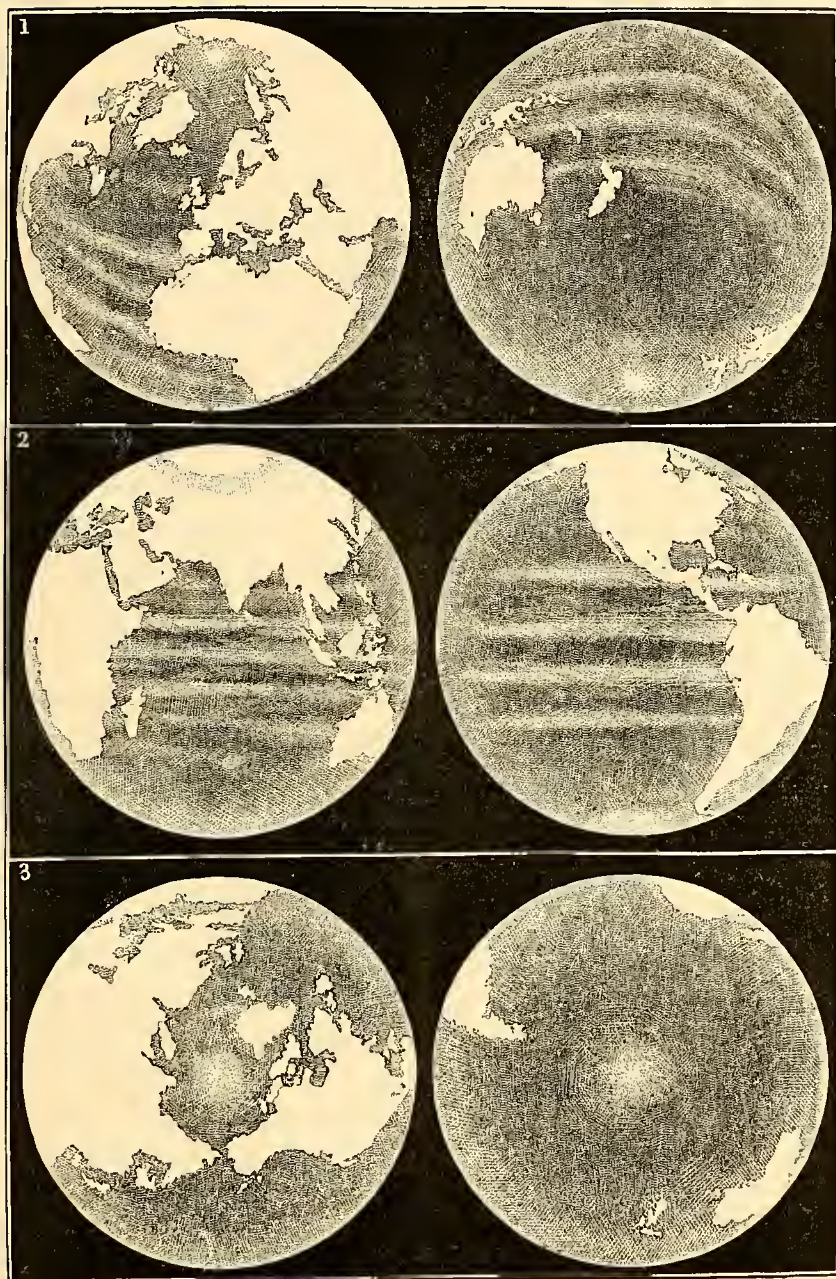
quarts[1]; l'autre quart comprend les terres, les continents et les îles. Or, il est curieux de voir que tout un hémisphère du globe terrestre renferme les terres, tandis que l'autre hémisphère est presque tout entier occupé par les eaux. Prenez un globe, placez-le de manière qu'il se présente à vous, avec Paris pour point central, et éloignez-vous à distance. Vous apercevrez sur l'hémisphère tourné vers vous, l'Europe, l'Asie et l'Afrique entières, l'Amérique du Nord et une partie de l'Amérique du Sud. Placez-vous au contraire à l'opposé, en face des antipodes de Paris, et sauf la Nouvelle-Hollande et la pointe inférieure de l'Amérique méridionale, vous verrez un hémisphère presque entièrement couvert par l'Océan, çà et là parsemé de petites îles.

Les dessins de la planche XII peuvent donner une idée de cette distribution des parties solides et liquides de la surface terrestre.

Si, de l'évaluation de la surface du globe, on passe à celle du volume, de la masse ou du poids, on arrive à des nombres dont il est difficile de se faire une idée juste, tant ils s'élèvent au-dessus de nos appréciations habituelles.

Concevons un volume cubique de mille mètres en longueur, largeur et hauteur : c'est ce qu'on nomme un kilomètre cube. Le sphéroïde terrestre contient plus de mille milliards de volumes pareils! (1 083 000 000 000). Des expériences et des calculs, dans le détail desquels il serait trop long d'entrer, ont établi la densité moyenne de la matière qui forme la Terre : nous disons la densité moyenne, parce que les différentes couches sont spécifiquement d'autant plus lourdes, que de la surface elles approchent plus du centre. Cette densité est telle, qu'à égalité de volume, la matière terrestre pèse près de cinq fois et demie autant que l'eau (5.44). On évalue au double la densité des parties centrales.

1. Mers, 383 260 000 kil. carrés; terres, 126 640 000 kil. carrés.



LE GLOBE TERRESTRE

Distribution des continents et des mers.

1. Hémisphère terrestre et hémisphère maritime. — 2. La Terre vue d'un point situé dans le plan de l'Équateur. — 3. La Terre vue d'un point pris sur l'axe, ou en face des pôles.

De là, pour le poids de la Terre entière, le nombre énorme de : 5 875 000 000 000 000 000 000 tonnes de mille kilogrammes.

L'enveloppe aérienne entourant le globe à une hauteur qui n'est pas encore exactement connue, mais qui dépasse probablement 100 kilomètres, ne pèse pas moins de 5 263 000 000 000 000 tonnes; c'est le poids d'une couche de mercure à 0 degré, qu'on supposerait reposer sur toute la surface du globe, et qui aurait 76 centimètres de hauteur (moyenne de la pression barométrique au niveau de la mer); c'est aussi le poids d'une sphère de fer fondu mesurant 216 kilomètres de diamètre. Quelque énorme que soit ce poids, il n'est pas même cependant la millionième partie (la 1 116 000e) du poids de la Terre solide et liquide.

Telles sont les dimensions, telle est la masse de la planète qui nous sert de demeure. Que sont en comparaison, et considérées sous l'unique point de vue de la matière, les œuvres du travail humain, individuel et collectif? Cependant, cette sphère qui nous paraît si colossale n'est qu'un grain de sable vis-à-vis du Soleil, notre étoile centrale, qu'une des moyennes planètes du système solaire, qu'un point perdu dans l'espace occupé par le monde qui les comprend toutes. Quelle idée devrons-nous donc nous faire de la profondeur des espaces célestes, lorsque, nous élançant plus tard hors du groupe dont la Terre fait partie, nous verrons que ce vaste ensemble n'est lui-même qu'un atome au sein de l'univers visible?

Nous venons de parler du poids total de l'atmosphère : c'est un point de pure curiosité. Mais la pression que cette masse fluide exerce sur chaque partie du sol, sur les êtres organisés qui s'y développent ou s'y meuvent, sur les liquides et les vapeurs, est d'une importance extrême pour la constitution de ces êtres et pour les conditions physiques du milieu

qui les renferme. La densité de l'atmosphère, la loi de la décroissance de cette densité, des couches inférieures aux couches supérieures, sont autant de faits qui ont un intime rapport avec la température du sol à ses diverses altitudes, avec les climats, et par suite avec la distribution de la vie végétale et animale à la surface [1].

D'autre part, il y a une relation non moins étroite entre la constitution de l'enveloppe gazeuse dans le sein de laquelle nous sommes plongés, et la façon dont les rayons de lumière en traversent l'épaisseur.

Par le fait de la déviation que subissent les rayons de lumière qui ne pénètrent pas verticalement dans l'atmosphère, toute étoile, tout objet céleste est d'autant plus relevé que sa position relative est plus voisine de l'horizon. C'est le phénomène connu sous le nom de *réfraction atmosphérique*. On comprend de quelle importance est la réfraction pour les observations astronomiques, puisque tous les astres, ceux du zénith exceptés, se trouvent ainsi déplacés, et que l'erreur résultant de ce déplacement n'est pas la même en tous les points de la voûte céleste : elle est d'autant plus considérable, que les couches traversées sont plus épaisses ou se présentent plus obliquement aux rayons lumineux.

Il résulte de là une conséquence assez bizarre, c'est que le Soleil ou la Lune sont encore mathématiquement couchés, c'est-à-dire se trouvent réellement au-dessous du plan de l'horizon, que déjà leurs disques entiers sont visibles. La durée du jour est donc directement augmentée par la réfraction. Le même phénomène a lieu le soir. Mais la réfraction prolonge cette durée, alors même que le Soleil a disparu pour la vue. Les couches supérieures de l'atmosphère sont encore illuminées, quand la surface du sol est déjà dans l'ombre.

1. Voyez LA TERRE, par Élisée Reclus ; IIe partie : *l'Océan*, *l'atmosphère*, *la vie*.

Elles réfléchissent vers la Terre une portion de cette lumière, de manière à nous faire passer du jour à la nuit par des gradations insensibles. Telle est la cause du crépuscule du soir. Un phénomène semblable produit l'aurore avant le lever du Soleil. Enfin la durée des crépuscules et des aurores varie suivant les saisons et suivant les latitudes.

Non-seulement la position apparente des astres est altérée par la réfraction de l'atmosphère[1], mais, pour la même raison, leur forme même s'en trouve modifiée. Cela est surtout

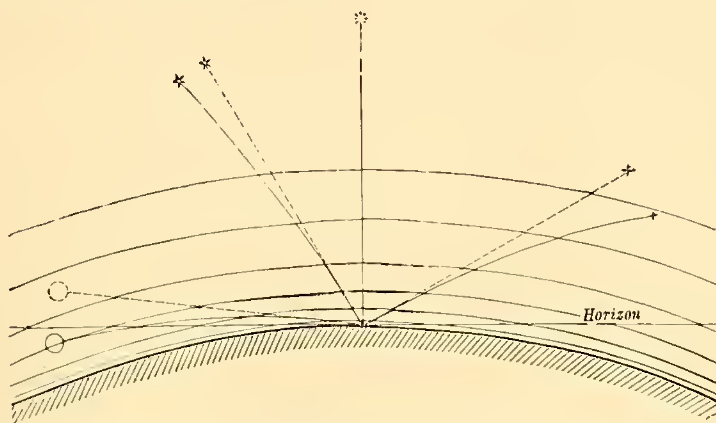


Fig. 99. Effets de la réfraction atmosphérique sur les hauteurs des astres, sur le lever ou le coucher du Soleil et de la Lune.

vrai pour les disques du Soleil et de la Lune. La réfraction, dont l'intensité est croissante à mesure qu'on s'approche plus de l'horizon, relève davantage les parties inférieures du cercle lumineux, de sorte que l'astre, déjà aplati dans sa moitié su-

1. Des tables de correction ont été calculées pour les diverses hauteurs ; ces tables permettent de trouver la position vraie d'un point lumineux, quand on en connaît par l'observation la position apparente. Néanmoins, on évite d'observer trop près de l'horizon, et l'on attend que l'astre, en vertu de la rotation diurne, ait atteint une hauteur suffisante, ou même son maximum de hauteur, au moment de la culmination ou du passage supérieur au méridien : de cette façon, les images télescopiques sont aussi beaucoup plus nettes. Voici, d'après la *Connaissance des Temps*, quelques nombres de la table de réfraction en question, calculés pour la température de $+10^0$ centigrades

périeure, l'est plus encore dans sa moitié la plus basse. C'est cette déformation que nous avons constatée en parlant de la forme du disque solaire, et que nous avons représentée dans les figures 1 et 2 de cet ouvrage (pages 27 et 28).

Ajoutons, pour terminer ce que nous avions à dire de l'enveloppe gazeuse dont notre planète est entourée, que l'atmosphère, en disséminant de tous côtés la lumière du Soleil, interpose entre les astres et la Terre un rideau lumineux qui voile pendant le jour la voûte étoilée. Sans cette lumière diffuse, le ciel, au lieu de cette teinte azurée que nous lui connaissons, présenterait un fond noir sur lequel les étoiles se détacheraient et brilleraient en plein jour.

§ 3. MOUVEMENT DE ROTATION DE LA TERRE.

La Terre tourne autour du diamètre de ses pôles en 86 164 secondes de *temps moyen :* la durée d'une rotation entière est donc plus courte de 236 secondes que celle du *jour moyen* de 24 heures. C'est cette durée qui constitue le *jour sidéral*, la base fondamentale de la mesure du temps en astronomie, le régulateur du temps civil.

et la pression $0^{m}.76$. Il y a des corrections à faire, quand la température et la pression barométrique varient :

Distances zénithales apparentes.	Réfractions.	Distances zénithales apparentes.	Réfractions.
0° zénith. . . .	0′ 0″0	81°	5′ 53″7
10°	0 10.3	82°	6 34.7
20°	0 21.2	83°	7 25.6
30°	0 33.7	84°	8 30.3
40°	0 48.9	85°	9 54.8
50°	1 9.4	86°	11 48.8
60°	1 40.7	87°	14 28.7
70°	2 38.9	88°	18 23.1
75°	3 34.5	89°	24 22.3
80°	5 20.0	90° horizon . . .	33 47.9

Tout le monde connaît le phénomène du *mouvement diurne*, mouvement apparent du ciel étoilé par lequel se manifeste le mouvement réel de notre globe sur son axe : lever et coucher du Soleil, de la Lune et d'un grand nombre d'étoiles ; arcs décrits d'un mouvement uniforme autour d'un point du ciel qui semble immobile et qui reste situé à une hauteur constante sur chaque horizon. Personne n'ignore que le mouvement apparent dont nous parlons, ayant lieu de l'Orient vers l'Occident, le sens de la rotation terrestre est précisément contraire, et s'effectue dès lors d'Occident en Orient. Mais ce qui est moins connu, c'est la raison de la différence de durée qui existe entre le jour sidéral et le jour solaire ; ce qu'on sait moins, c'est que, tandis que le jour sidéral conserve sa durée constamment la même [1] pendant une longue suite de siècles, les jours solaires d'une même année sont inégaux en longueur. Entrons dans quelques détails sur le premier point ; nous aurons bientôt l'occasion d'insister sur le second.

Supposons une pendule bien réglée, c'est-à-dire marchant uniformément, n'importe d'ailleurs l'heure qu'elle marque. Puis, à l'aide d'une lunette dont l'axe est fixé dans le plan méridien [2], notons l'instant précis où une étoile vient passer par le plan, entraînée qu'elle est par le mouvement diurne. Cette étoile va être notre point de repère, pour mesurer la durée du jour sidéral ou de la rotation de la Terre. La lunette restant dans la même position, les deux nuits suivantes,

1. On verra plus loin, toutefois, que l'invariabilité de la vitesse du mouvement de rotation de la Terre n'est pas absolue ; mais il faudra des milliers d'années, pour que le changement soupçonné devienne directement appréciable. Nous y reviendrons.

2. On appelle *méridien* d'un lieu de la Terre le plan vertical, indéfiniment prolongé dans l'espace, qui passe par les points Nord et Sud de l'horizon de ce lieu. Quand une étoile passe au méridien, elle est au point le plus élevé de sa course diurne apparente. De là, le nom de *culmination* donné à ce passage. Il y a nécessairement, à chaque rotation, un second passage au méridien ; c'est le *passage inférieur*, qui n'est observable en chaque lieu de la Terre que pour les étoiles circompolaires de la latitude de ce lieu.

puis plusieurs nuits de suite si bon nous semble, nous noterons de même les instants du passage de l'astre au méridien. La comparaison des temps écoulés entre deux passages successifs nous conduira à cette conséquence, que ces temps sont toujours rigoureusement égaux d'une rotation à l'autre, quelle que soit d'ailleurs l'étoile qu'on ait choisie, pourvu que ce ne soit ni le Soleil, ni la Lune, ni une planète. Ainsi la durée de la rotation terrestre, ou ce qui revient au même du jour sidéral, est constante ; et l'on trouve qu'elle comprend 86 164 secondes, ou 23 heures 56 minutes 4 secondes, si la pendule qui a servi à cette constatation a été réglée sur le temps moyen, que nous allons bientôt définir.

Que maintenant, par la même méthode, on compare les intervalles qui s'écoulent entre les passages successifs du centre du Soleil au méridien, on constate les deux résultats suivants, bien différents du premier : 1° ces intervalles ne sont pas rigoureusement égaux entre eux ; et, comme c'est à leurs durées qu'on donne le nom de *jours solaires*, on en conclut déjà que les jours solaires d'une même année sont inégaux ; 2° le Soleil est plus long à revenir au méridien que l'étoile : en moyenne, le retard de chaque jour est de 3 minutes 56 secondes (temps moyen) ; autrement dit, la durée moyenne d'un jour solaire est de 24 heures.

Voilà donc des faits bien constatés ; il s'agit maintenant d'en donner l'explication. Disons auparavant que la durée du jour sidéral étant parfaitement constante, tandis qu'il n'en est point ainsi de celle du jour solaire, c'est naturellement la première qui devait servir de régulateur à l'autre, et c'est en effet ce que font les astronomes qui règlent leurs horloges sur le temps sidéral[1].

1. Le jour sidéral se divise, comme le jour solaire, en 24 heures. Chaque heure sidérale contient 60 minutes, chaque minute sidérale 60 secondes. Cette inégalité des jours solaires a fait choisir pour unité du temps civil, un jour fictif, qu'on nomme jour solaire *moyen*, parce qu'il est la moyenne de

La raison des phénomènes précédents est très-simple.

La Terre, comme toutes les autres planètes, est animée de deux mouvements principaux : l'un de rotation autour d'un de ses diamètres, l'autre de circulation autour du Soleil. Le mouvement de rotation est uniforme; l'axe autour duquel ce mouvement s'effectue reste parallèle à lui-même, tout en se déplaçant dans l'espace avec le sphéroïde auquel il appartient. Rapporté aux étoiles, dont la distance est comme infinie, le mouvement de rotation donne lieu aux mêmes apparences que si la Terre restait immobile au milieu de l'espace : l'orbite immense qu'elle décrit autour du Soleil n'étant qu'un point presque imperceptible vis-à-vis des distances stellaires. On reconnaîtra donc qu'une rotation entière s'est effectuée, quand le plan méridien BOA qui contenait, à un moment donné, une certaine étoile située dans la direction BE (fig. 100), est venu après son mouvement de rotation se placer en A'O'B' parallèlement à sa première position, de manière à contenir de nouveau l'étoile E. Telle est la durée du jour sidéral.

Mais le jour solaire est plus long, comme on va voir. En effet, supposons qu'au même méridien BOA, on ait noté, à midi, le passage du centre du Soleil par son plan, au moment où l'on constatait à l'opposé le passage au méridien d'une étoile à minuit. Quand un jour sidéral est écoulé, la Terre ayant parcouru l'arc OO' de son orbite, concave vers le Soleil, le méridien OA s'est placé en O'A' parallèlement à sa direction primitive : il contient bien l'étoile, mais il lui reste à tourner encore d'un certain angle[1] A'O'S' pour se trouver de nouveau en coïncidence avec le centre du Soleil. Au fond, la raison de

tous les jours solaires de l'année. C'est ce jour moyen qu'on partage en 24 heures. L'heure moyenne est donc plus longue que l'heure sidérale, laquelle du reste n'est employée, comme le jour sidéral, qu'en astronomie.

1. Cet angle est précisément égal à celui que décrit, en un jour sidéral, la ligne joignant les centres de la Terre et du Soleil, ligne qu'on nomme le *rayon vecteur* de la Terre.

la différence de durée est, comme on voit, tout entière dans ce double fait : d'une part, la distance pour ainsi dire infinie de l'étoile comparée à la distance de la Terre au Soleil, et d'autre part, le mouvement de translation de notre planète autour de l'astre radieux.

L'axe polaire, prolongé de part et d'autre du globe, coupe la Terre en deux points qui sont, pour nous, les pôles immo-

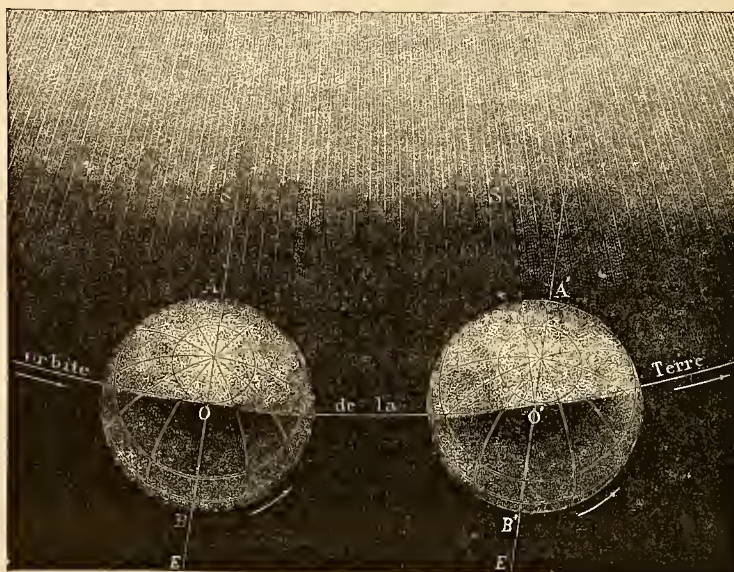


Fig. 100. Différence de durée du jour sidéral et du jour solaire.

biles du ciel[1]. En réalité, par le fait de la translation de la Terre, l'axe décrit, en restant à peu de chose près parallèle à lui-même, une surface cylindrique, qui coupe la voûte étoilée suivant une courbe semblable à l'orbite de la Terre : mais les étoiles sont si éloignées, que la perspective de cette

1. Immobilité relative. Nous verrons qu'en vertu d'un balancement ou plutôt d'une révolution conique de l'axe terrestre, qui produit le phénomène connu sous le nom de *précession des équinoxes*, ces pôles se déplacent lentement d'année en année. Un autre mouvement, la *nutation*, dont la période est beaucoup plus courte, altère aussi le parallélisme en question.

courbe est de dimensions presque insensibles. L'axe semble passer toujours par les mêmes points du ciel.

Puisque la Terre a la forme d'une sphère, et qu'elle tourne avec une vitesse angulaire uniforme autour d'une ligne idéale de direction invariable, il doit résulter de ce mouvement des vitesses différentes pour les divers points de sa surface. Aux deux pôles, cette vitesse est nulle; mais des pôles à l'Équateur, elle grandit sans cesse, puisque les rayons des cercles décrits par les points successifs d'un méridien, ou si l'on veut les distances à l'axe de rotation, croissent à mesure que ces points sont plus voisins de l'Équateur. En vingt-quatre heures, le cercle décrit par un point du globe situé à la latitude de Paris est parcouru en entier, tout comme le cercle parallèle décrit à la latitude de Reikiawitz en Islande, ou comme l'Équateur décrit par un point des environs de Quito. Or, ces cercles sont de longueurs bien différentes. De là, des vitesses réelles fort inégales, et qui sont : pour Reikiawitz, 202 mètres; pour Paris, 305 mètres; pour Quito, 465 mètres par seconde. C'est, si l'on préfère, 727 kilomètres, 1098 kilomètres et 1670 kilomètres, respectivement parcourus en une heure par chacun des points du globe qui se trouvent à ces diverses latitudes.

Comment se fait-il, qu'emportés avec une telle vitesse, nous ne nous apercevions point de notre mouvement? C'est que la masse entière du sol, l'atmosphère et les nuages[1] participent au même mouvement d'ensemble, et que nous n'avons de point de repère dans aucun objet immobile un peu voisin de nous. Cette vitesse, dont tous les corps situés à la surface de la

1. Si l'atmosphère, si les vapeurs et les nuages qu'elle renferme étaient immobiles, pendant que le sol et tous les objets placés à sa surface tournent avec une vitesse qui est, à Paris, de 305 mètres par seconde, il devrait en résulter, de l'Est à l'Ouest, un vent de même vitesse, dix fois plus violent dès lors que les ouragans les plus terribles. L'absence d'un tel ouragan aérien est une preuve expérimentale convaincante de la participation de l'enveloppe atmosphérique au mouvement de rotation de la Terre.

Terre sont animés, et qui va en croissant de chaque pôle vers l'Équateur, donnerait lieu à la catastrophe la plus terrible et la plus générale qu'on puisse imaginer, si par impossible la rotation de la Terre venait à cesser brusquement. Un tel événement serait le signal de la destruction la plus complète de tous les êtres organisés, broyés par un choc formidable ou entièrement consumés. Il résulte en effet des calculs d'Helmholtz, que la force de rotation de la Terre, convertie en chaleur par un arrêt subit, suffirait à la combustion complète de 15 sphères de houille ayant chacune le volume de notre globe. Ce calcul est bien propre à donner une idée de la prodigieuse quantité de mouvement que possède le globe terrestre en vertu de sa seule rotation ; mais la constance des lois de la nature nous laisse sans crainte devant l'hypothèse d'un semblable événement.

Le mouvement de rotation de la Terre, soupçonné par quelques anciens, a été scientifiquement démontré, il y a seulement trois siècles, par Copernic (1543). Dans son immortel ouvrage des *Révolutions célestes*, le chanoine de Thorn dévoile le véritable système du monde, basé sur l'immobilité relative du Soleil et sur le double mouvement de rotation et de translation de la Terre, enfin rangée au nombre des planètes. Ce n'est pas sans peine que la nouvelle doctrine triompha de ses puissants adversaires, qui du reste ne se contentèrent point de lui opposer leurs arguments, comme le prouve la persécution subie par Galilée (1633). Personne aujourd'hui ne croit plus à l'immobilité de la Terre, et les preuves de la rotation sont si nombreuses et si concluantes, que nous nous contenterons d'en faire une énumération rapide, en renvoyant le lecteur pour les détails aux traités de cosmographie.

Un premier témoignage est celui de l'analogie : nous avons vu le Soleil, Mercure et Vénus, doués de mouvements de rotation : nous verrons bientôt la Lune, Mars, Jupiter, Saturne, tourner aussi autour d'un de leurs diamètres. A cette preuve,

il faut joindre l'invraisemblance du mouvement simultané que tous les astres, étoiles, planètes, Soleil devraient effectuer en 24 heures autour de notre globe, s'il était immobile. Un tel mouvement supposerait dans les astres les plus éloignés des vitesses effrayantes, et nécessiterait d'ailleurs une concordance dont la seule pensée réduit l'hypothèse à l'absurde : tandis que la Lune parcourrait 23 kilomètres par seconde, le Soleil 9200 kil., Jupiter 4600, Saturne 88 000, l'étoile la plus voisine de notre monde devrait franchir dans le même temps près de 2 milliards de kilomètres, et serait ainsi animée d'une vitesse dépassant 6600 fois la vitesse de propagation des ondes lumineuses.

Viennent ensuite les preuves expérimentales : la déviation orientale, très-petite à la vérité, mais constatée par l'observation, qui a lieu dans la chute d'un corps tombant d'une certaine hauteur sous l'influence de la gravité ; cette déviation est la conséquence de l'excès de vitesse absolue que la rotation terrestre imprime à un corps, à mesure qu'il est plus éloigné de l'axe. Puis, c'est la déviation apparente du plan d'oscillation d'un pendule librement suspendu en un point, ou du plan de rotation d'un tore ou gyroscope, admirables expériences dues à Léon Foucault.

Citons enfin la forme même du sphéroïde terrestre, forme qu'on démontre, soit par le calcul, soit par l'expérience, être la conséquence forcée du mouvement de rotation et de l'état primitif fluide ou pâteux de la Terre ; par un effet combiné de la force centrifuge développée, ainsi que de la gravité mutuelle des particules matérielles qui composent notre planète[1],

1. Les mesures géodésiques ont prouvé, nous l'avons vu, l'aplatissement de la Terre. D'autre part, les expériences du pendule ont fait voir que la force de la pesanteur est moindre à l'équateur qu'aux pôles, et que la diminution totale est une fraction égale à la 194e partie de la gravité, de sorte que le poids d'un même corps, transporté des pôles à l'équateur, serait diminué d'environ cinq grammes par kilogramme. Or, cette diminution est due à deux causes : un point de l'équateur étant plus éloigné de 21 kilomè-

la masse a dû prendre la forme d'un ellipsoïde aplati aux deux pôles de rotation.

Nous avons déjà fait remarquer (note de la page 299) que l'axe de rotation de la Terre, au lieu de rester parallèle à lui-même, comme on peut le supposer avec une approximation suffisante pour l'intelligence des phénomènes que nous allons décrire, est dévié lentement sous l'influence de la masse énorme du Soleil et de la masse beaucoup plus petite, mais beaucoup plus rapprochée, de la Lune, agissant l'une et l'autre sur le renflement équatorial. Il en résulte que le mouvement de rotation, cause primitive de l'existence de ce bourrelet, est lui-même modifié par une réaction sur la masse de ce dernier. Mais la direction de l'axe polaire paraît invariable relativement au globe lui-même, de sorte que la position géographique des deux pôles ne change pas, ainsi que le prouve l'invariabilité constatée des latitudes des divers points de la Terre.

§ 4. MOUVEMENT DE TRANSLATION DE LA TERRE AUTOUR DU SOLEIL.

L'orbite que la Terre décrit annuellement autour du Soleil est une courbe plane, c'est-à-dire entièrement contenue dans un plan qui passe par les centres des deux astres : c'est ce plan qu'on connaît sous le non d'*écliptique*. Comme toutes les orbites planétaires, l'orbite terrestre est une ellipse dont l'un des foyers est occupé par le Soleil, et dont les dimensions sont exprimées par les nombres suivants, que nous avons eu

tres du centre de la Terre qu'un point situé aux pôles, l'intensité de la pesanteur y est diminuée d'une fraction de sa valeur que le calcul évalue à $\frac{1}{590}$; de plus, à l'équateur, la vitesse de rotation développe une force centrifuge qui réduit la même intensité de $\frac{1}{289}$; ces deux fractions en s'ajoutant font une somme égale à $\frac{1}{194}$. Ce double effet va du reste en diminuant graduellement de l'équateur vers chaque pôle.

déjà l'occasion de donner en parlant des distances où nous nous trouvons du Soleil :

Distance périhélie. . .	0.98323	22 855 ray. équat.	145 700 000 kil.
Distance moyenne. . .	1.00000	23 245	148 250 000
Distance aphélie. . . .	1.01677	23 630	151 800 000

Excentricité de l'orbite terrestre. . . . . . . 0.01677.

La différence des distances extrêmes est donc de 775 rayons de l'équateur, 6 100 000 kilomètres ou 1 500 000 lieues.

La longueur totale de l'immense courbe décrite par la Terre est, en nombres ronds, de 930 millions de kilomètres, ou de 232 millions 500 mille lieues. Enfin, la durée du voyage de circumnavigation que nous faisons ainsi tous les ans, portés par notre navire céleste, est de 365 jours moyens et un peu plus d'un quart de jour (exactement $365^{j}.2563744$ ou 365 jours 6 heures 9 minutes 10.748 secondes). Il est aisé d'en déduire la vitesse moyenne de la Terre. En un jour, elle franchit 2 544 200 kilomètres (longueur de l'arc de 3548″ décrit en 24 heures sur son orbite); c'est une vitesse de 2602 kil. par heure, de 29 450 mètres par seconde. Mais cette vitesse est variable : elle diminue quand la Terre s'éloigne du Soleil, de sorte qu'à l'aphélie, elle n'est plus que de 28 960 mètres par seconde; elle augmente quand la distance au Soleil diminue, pour atteindre, au périhélie, le maximum de 30 000 mètres. Ainsi, pendant que la Terre effectue une rotation entière autour de son axe, elle s'avance sur son orbite d'une longueur qui n'est pas moindre de 200 fois son diamètre. Dans la figure 101, on voit combien est grand le chemin parcouru en six heures, relativement aux dimensions du globe lui-même. Un point de l'équateur qui se meut avec la vitesse de 465 mètres par seconde autour de l'axe, est transporté dans le même temps à une distance de 29 450 mètres; la translation de la Terre lui fait parcourir le long de l'orbite un chemin 63 fois

plus considérable que le chemin dû au seul mouvement de rotation [1].

Que l'on songe maintenant aux dimensions du globe, à la masse énorme de la Terre, et l'imagination restera confondue en présence de ce mobile gigantesque qui franchit l'espace avec une telle rapidité. Un calcul de deux physiciens contemporains, Helmholtz et Mayer, analogue à celui que nous avons rapporté plus haut au sujet du mouvement de rotation, donnera peut-être une idée du prodigieux mouvement qui emporte notre globe dans les régions circumsolaires. Ces savants ont cherché quelle serait la chaleur développée par le seul fait d'un arrêt brusque de la Terre dans son orbite, arrêt qui équivaudrait à un choc effroyable. Ils ont trouvé que cette



Fig. 101. Chemin que fait la Terre en un quart de jour sidéral.

chaleur suffirait non-seulement pour fondre le globe tout entier, mais encore pour réduire une grande partie des masses minérales dont il est formé, à l'état de vapeur.

Le mouvement de rotation, nous l'avons vu, est uniforme, tandis que la vitesse de translation de la Terre est variable. Il résulte de là que les jours solaires ne sont pas égaux, c'est-à-dire qu'entre deux retours consécutifs du même plan méridien au Soleil, le temps écoulé varie suivant la position de la Terre sur son orbite; l'arc de rotation qui mesure l'excès du jour solaire sur le jour sidéral est tantôt plus petit, tantôt plus grand que l'arc moyen. Cette inégalité est accrue par une

1. L'axe de rotation n'étant pas perpendiculaire au plan du mouvement de translation, l'espèce de cycloïde qui constitue la trajectoire d'un point entraîné par ce double mouvement, n'est pas plane : c'est une ligne à double courbure, décrite en partie au-dessus, en partie au-dessous de l'écliptique.

autre cause qui est l'obliquité du plan de l'écliptique par rapport au plan de l'équateur de la Terre. Pour remédier à ce défaut d'égalité, les astronomes ont pris pour la durée du jour solaire, la moyenne des durées inégales des jours solaires de toute une année. C'est ce qu'on nomme le *jour moyen*, dont la division en 24 heures, ou en 86 400 secondes, sert à mesurer le temps civil et souvent aussi le temps astronomique[1]. Telle est l'unité à laquelle nous rapportons toutes les durées indiquées dans cet ouvrage, et qui nous a servi plus haut à dire que :

Le jour sidéral, durée d'une rotation de la Terre, vaut 23 heures 56 minutes et 4 secondes de temps moyen[2].

Maintenant que nous savons quel est, en réalité, le mouvement de translation de la Terre autour du Soleil, mouvement dont nous n'avons pas plus conscience que du mouvement de rotation, indiquons rapidement les apparences par lesquelles il se manifeste à nos yeux. S'il est vrai que notre planète se meuve ainsi dans une orbite fermée, autour du Soleil relativement immobile, à mesure qu'elle marchera dans un sens en décrivant un certain arc de sa trajectoire, l'astre radieux semblera décrire un arc pareil en sens contraire. En sens contraire, quand on considère isolément les arcs décrits :

1. On nomme *équation du temps* la différence entre le *midi astronomique*, heure à laquelle le centre du Soleil passe réellement au méridien d'un lieu, et le *midi moyen*, milieu du jour moyen. De là, cette espèce de paradoxe qui consiste à dire qu'une montre bien réglée, c'est-à-dire réglée sur le temps moyen, ne doit pas marcher avec le Soleil. L'équation du temps, qui est à peu près nulle quatre fois par an, n'atteint pas au maximum 17 minutes. Voici ses valeurs maxima et minima pour l'année 1876 :

Dates.	Eq. du temps.	Dates.	Éq. du temps.
11 février	$+ 14^m 30^s$	25 juillet	$+ 6^m 15^s$
14 avril	+ 0 9	31 août	+ 0 2
14 mai	— 3 52	2 nov.	— 16 20
14 juin	+ 0 2	24 déc.	+ 0 6

2. Ou, si l'on veut, un jour solaire moyen est égal à 1 jour sidéral, augmenté de $3^m 56^s 555$ de temps sidéral.

mais si l'on compare, dans la figure 102, la courbe réelle décrite par la Terre avec la courbe apparente décrite par le Soleil, on voit tout de suite que les sens sont les mêmes. De sorte que le mouvement propre du Soleil — qui cause le retard de son passage au méridien ou, ce qui revient au même, l'inégalité du jour solaire et du jour sidéral — ayant lieu d'Occident en Orient, le mouvement réel de la Terre s'effectue aussi dans le même sens. Le Soleil doit donc paraître se déplacer à tout instant sur le fond étoilé du ciel, et son centre coïncider, d'un jour à l'autre, avec des étoiles différentes. Pen-

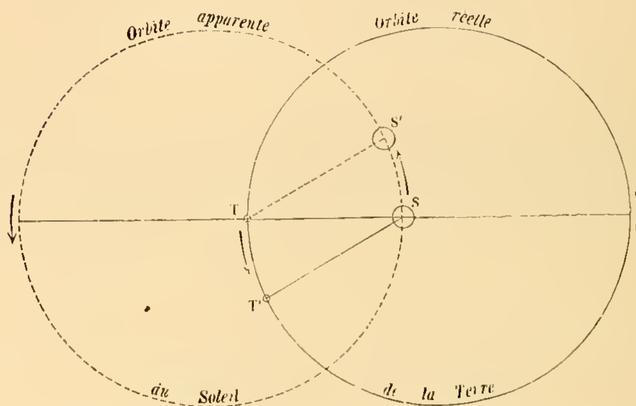


Fig. 102. Orbite réelle de la Terre, et orbite apparente du Soleil.

dant le jour, ce déplacement n'est pas sensible, quand on ne prend pas une mesure rigoureuse de la position du Soleil. Mais il suffit de songer qu'au déplacement dont il s'agit correspond un mouvement analogue du ciel pendant la nuit, pour comprendre que l'aspect des constellations doit varier durant tout le cours d'une année. Grâce à la translation de la Terre, en effet, le ciel défile progressivement sur l'horizon d'un lieu donné, sinon dans son entier, du moins dans la portion susceptible de s'élever en vertu du mouvement diurne au-dessus de cet horizon.

La durée de l'année est, nous l'avons vu, d'environ 365 jours 1/4. Il s'agit ici de jours solaires moyens. Combien, pendant la même durée, notre globe exécute-t-il de rotations entières sur son axe? 366 1/4. En d'autres termes, le nombre des jours solaires de l'année étant de 365 1/4, le nombre des jours sidéraux est précisément plus grand d'une unité. C'est là une conséquence directe de la translation de la Terre, combinée avec son mouvement diurne de rotation. Le même fait se reproduit d'ailleurs nécessairement dans toutes les planètes, quel que soit le nombre des rotations qu'elles accomplissent pendant une révolution complète autour du Soleil, et quelles que soient les durées de leurs jours sidéraux et solaires. Rappelons-nous qu'après une rotation entière, le Soleil, qui au point de départ passait au méridien en même temps qu'une étoile donnée (fig. 100), se trouve en retard d'environ 4 minutes. A la rotation suivante, nouveau retard qui s'ajoute au précédent, et ainsi de suite, jusqu'à ce que la révolution annuelle étant terminée, les choses se trouvent au même état qu'à l'origine. Or, si pour revenir à une coïncidence du Soleil avec l'étoile qui sert de terme de comparaison, la Terre a effectué 366 rotations sur son axe, l'étoile aura passé 366 fois au méridien, tandis que le Soleil, justement en retard d'un passage, sera revenu au méridien une fois de moins que l'étoile, c'est-à-dire seulement 365 fois.

Nous avons donné plus haut la durée précise de la révolution sidérale de la Terre, de ce qu'on nomme l'*année sidérale*. Mais il ne faut pas confondre cette durée avec celle de l'*année tropique*, qui est celle adoptée pour la mesure du temps civil. Voici la raison de cette différence. Parmi les points que la Terre parcourt successivement sur son orbite, il en est dont la détermination précise a pour nous une grande importance, parce que ce sont les points de départ des saisons : ce sont les équinoxes et les solstices. Deux retours successifs de notre planète à l'un de ces points, par exemple à l'équinoxe du prin-

temps, servent à définir l'*année tropique*, dont la durée est ainsi l'intervalle de temps qui s'écoule entre deux passages consécutifs de la Terre à l'équinoxe du printemps. Or, depuis 2000 ans environ, on sait que le retour à l'équinoxe est toujours en avance sur le retour du Soleil à la même étoile, et qu'ainsi l'année tropique est un peu plus courte que l'année sidérale [1]. D'un grand nombre d'observations, on a conclu pour la durée de l'année tropique :

$365^{j.m.}.2422166$, c'est-à-dire 365 jours moyens 5 heures 48 minutes 47.514 secondes. La différence de l'année tropique à l'année sidérale est donc de $20^{m}23^{s}.234$, ou $0^{j.m.}.0141578$.

Enfin, pour achever ce que nous avions à dire du mouvement de translation de la Terre et de son orbite, ajoutons que le grand axe de cette orbite n'a pas, sur son plan, une position invariable, de sorte que l'un de ses points, le périhélie par exemple, se déplace chaque année en avançant dans le sens du mouvement de la Terre. L'année sidérale ne doit donc pas non plus s'entendre du retour de la Terre à un même point géométrique de son orbite.

Passons à d'autres phénomènes d'un grand intérêt pour nous autres habitants de la Terre, phénomènes qui ont leur cause dans le double mouvement de notre planète.

D'un jour de l'année à l'autre, les habitants d'un même lieu voient le Soleil s'élever au-dessus de leur horizon, à des hauteurs variables, les mêmes d'ailleurs pour les lieux qui ont même latitude. Les points de l'Orient ou de l'Occident où l'astre radieux se lève et se couche, changent de place ; le Soleil à midi s'élève plus ou moins haut, et la durée de son séjour diurne au-dessus de l'horizon donne aux jours et aux nuits des longueurs inégales et variables. De là, pour le

1. Pour la cause de ce phénomène, connu sous le nom de *précession des équinoxes*, voyez la Troisième partie du Ciel.

même lieu, des températures, des conditions climatériques très-diverses; de là, les *Saisons*.

D'autre part, ces conditions elles-mêmes changent, non-seulement d'un hémisphère à l'autre de la Terre, mais encore pour le même hémisphère, selon la latitude du lieu considéré. De là, les climats, les zones glaciales aux longs jours et aux longues nuits, les zones tempérées, les zones torrides, et les régions voisines de l'Équateur qui ont chaque année deux étés et deux hivers, et où la durée du jour est sans cesse égale à celle de la nuit.

La raison astronomique de tous ces phénomènes réside, je le répète, dans les mouvements simultanés de la Terre. Mais il est une circonstance qui influe sur leur succession d'une façon prédominante, et sur laquelle je vais prier le lecteur de fixer son attention. Qu'il jette les yeux sur la planche XIII, qui représente l'orbite de la Terre et la position de notre planète en divers points de cette courbe : il sera frappé de voir que l'axe de rotation n'est ni perpendiculaire au plan dans lequel l'orbite est tracée, ni couché dans ce plan, mais qu'il forme avec lui un certain angle, à peu près égal aujourd'hui (1876) aux deux tiers d'un angle droit (66° 32′ 32″ [1]). Cette inclinaison est constante pendant toute l'année, ou du moins ne varie qu'entre des limites extrêmement faibles. En outre, l'axe reste toujours parallèle à lui-même. C'est le parallélisme de l'axe qui rend compte de la position à peu près invariable du pôle céleste au-dessus de l'horizon de chaque lieu terrestre, pourvu

1. Le plan de l'équateur de la Terre est donc incliné sur le plan de l'écliptique de 23° 27′ 28″. C'est à cet angle qu'on donne le nom d'*obliquité de l'écliptique;* sa valeur n'est pas constante : par l'action de plusieurs planètes, elle diminue d'environ 48″ par siècle, pour croître ensuite d'une aussi faible quantité pendant une période fort longue, mais d'une étendue indéterminée. Euler, Lagrange, Laplace ont étudié cette question difficile, et il résulte de leurs recherches que l'oscillation du plan de l'Équateur autour de son inclinaison moyenne n'atteint pas 3° (2° 42′ en tout, ou 1° 21′ pour chaque période d'augmentation ou de diminution).

qu'on y joigne un fait aujourd'hui parfaitement prouvé, je veux dire la distance presque infinie des étoiles à la Terre.

L'axe restant parallèle à lui-même, il est clair qu'il en est de même du plan de l'Équateur, et par conséquent de la trace de ce plan sur l'écliptique. Deux fois à chaque révolution annuelle de la Terre, cette trace va passer par le Soleil ; en d'autres termes, deux fois par an (en mars et en septembre), le Soleil est dans l'équateur de la Terre : ces deux positions diamétralement opposées sont celles des deux *Équinoxes*. Tout le reste de l'année, le Soleil est au nord ou au sud du plan de l'Équateur, dont il est d'autant plus éloigné que la Terre est elle-même plus éloignée des équinoxes. Enfin, deux fois par an (en juin et en décembre), la Terre atteint une position telle, que la distance angulaire du Soleil à l'Équateur devient maximum, et égale à l'obliquité de l'écliptique. Ce sont les époques des *Solstices*.

Avant de dire quelles sont les conséquences de ces positions du globe terrestre sur son orbite, donnons l'ordre et les dates de leur succession :

Vers le 20 mars, la Terre se trouve au premier de ces points, qu'on nomme l'Équinoxe du Printemps. Puis viennent le Solstice d'Été aux environs du 21 juin, l'Équinoxe d'Automne près du 22 ou du 23 septembre, et enfin le Solstice d'Hiver qui tombe ordinairement du 20 au 22 décembre[1]. Chacun de ces points marque l'origine de la saison dont il porte le nom. Les époques précises de ces quatre positions fondamentales de la Terre sur son orbite varient chaque an-

1. Ces dénominations propres aux saisons de l'hémisphère boréal, doivent être renversées pour l'hémisphère austral, puisque ce dernier a l'hiver en juin, l'été en décembre, le printemps en septembre et l'automne en mars. Elles deviendraient universelles, si l'on convenait de dire comme l'a proposé Elisée Reclus : *Solstice de juin* ou *de décembre*, *Équinoxe de mars* ou *de septembre*.

née, mais dans une limite assez restreinte, comme on peut s'en rendre compte au moyen du tableau suivant :

COMMENCEMENT DES QUATRE SAISONS DANS L'HÉMISPHÈRE BORÉAL EN TEMPS MOYEN DE PARIS.

	En 1876.	En 1877.
PRINTEMPS.	Le 20 mars à 6^h 19^m du matin.	Le 20 mars à 11^h 57^m du matin.
ÉTÉ	Le 21 juin à 2^h 41^m du matin.	Le 21 juin à 8^h 27^m du matin.
AUTOMNE. .	Le 22 sept. à 5^h 8^m du soir.	Le 22 sept. à 10^h 57^m du soir.
HIVER . . .	Le 21 déc. à 11^h 3^m du matin.	Le 21 déc. à 4^h 59^m du soir.

Quand la Terre est à l'un ou à l'autre des Équinoxes, le plan de l'Équateur prolongé passe précisément par le centre

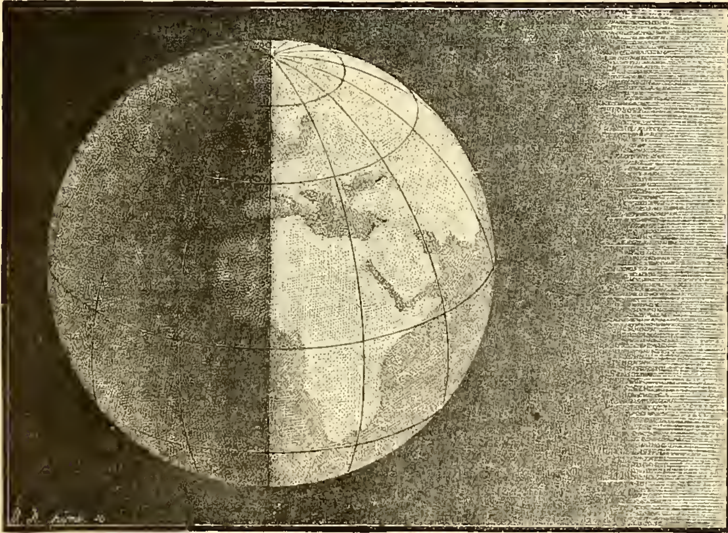


Fig. 103. La Terre aux équinoxes : égalité générale du jour et de la nuit.

du Soleil. Les deux pôles de la planète sont alors symétriquement placés par rapport à l'astre radieux, et le cercle de séparation de l'hémisphère éclairé et de l'hémisphère obscur se trouve être un méridien. Que résulte-t-il de cette position particulière? Que chaque point de la Terre, quelle que soit d'ailleurs sa latitude, décrit dans la lumière la moitié de la circonférence que lui fait parcourir la rotation du globe :

l'autre moitié est décrite dans l'ombre. C'est ce que la figure 103 fait aisément comprendre.

Ainsi, à l'époque des équinoxes, la durée du jour est égale à celle de la nuit par toute la Terre. Le Soleil reste douze heures au-dessus de chaque horizon, douze heures au-dessous.

De l'Équinoxe du Printemps au Solstice d'Été, la Terre parcourt la portion de son orbite qui correspond aux mois d'avril, de mai, de juin. Son axe restant toujours parallèle à lui-même, l'un de ses pôles, le pôle Nord, se tourne de plus en plus vers le Soleil ; pendant la même période, le pôle austral au contraire s'en détourne sans cesse. Le jour et la nuit sont de plus en plus inégaux en durée, et cette inégalité atteint son maximum vers le 21 juin, le jour du Solstice (fig. 104). Le cercle de séparation de l'ombre et de la lumière s'est progressivement éloigné du pôle. Il en résulte que la durée des nuits de l'hémisphère boréal a été sans cesse en décroissant, le jour grandissant au contraire, et cela dans des proportions d'autant plus grandes, qu'il s'agit de lieux de la Terre plus éloignés de l'Équateur. L'hémisphère austral a vu, pendant cette période, se succéder des phénomènes inverses ; à l'Équateur seul, le jour a continué d'être égal à la nuit.

Du 21 juin au 22 septembre, la Terre passe du Solstice d'Été à l'Équinoxe d'Automne. Pendant cette seconde période, c'est toujours le pôle nord qui est tourné vers le Soleil, tandis que le pôle sud reste plongé dans l'ombre ; les alternatives du jour et de la nuit présentent en ordre inverse, pendant l'Été, les mêmes phénomènes que pendant le Printemps.

Ainsi, pendant six mois, les régions qui touchent au pôle boréal ont continuellement eu le Soleil au-dessus de leur horizon, celles du pôle austral l'ont toujours eu au-dessous. De là, pour ces déserts glacés, un jour de six mois, puis une nuit de six mois tempérée, il est vrai, par un crépuscule continuel. A chaque vingt-quatre heures, par le fait de la rotation diurne, le Soleil y décrit en rasant l'horizon une courbe, sinon tout à fait paral-

lèle à ce plan, du moins formant une double spirale dont une moitié monte sans cesse jusqu'au Solstice d'été ; ce jour-là, le Soleil est élevé de $23^\circ 27'$ au-dessus de l'horizon du pôle ; alors il commence à redescendre et décrit la seconde moitié de ses spires depuis le 20 juin jusqu'à l'origine de l'Automne, c'est-à-dire jusqu'à l'équinoxe du 22 septembre. A cette époque, il se couche pour ne plus reparaître qu'au bout de six mois.

Si l'on a bien compris cette marche de la Terre pendant

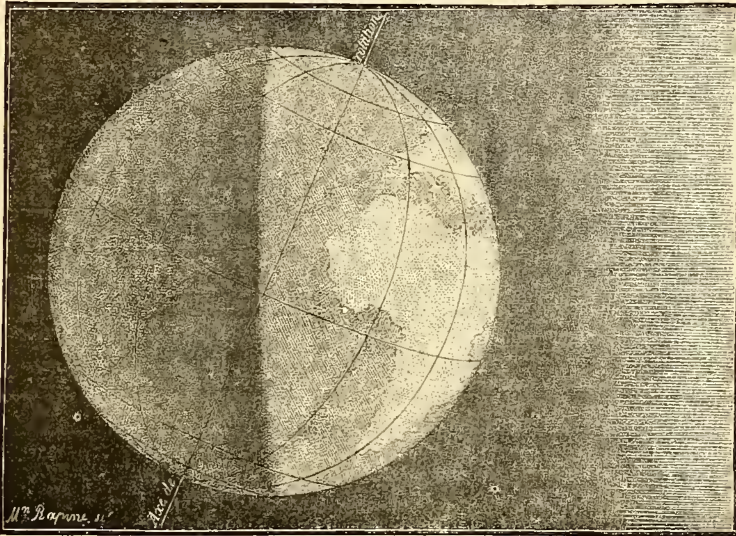


Fig. 104. La Terre aux solstices; inégalité de durée des jours et des nuits.

une moitié de l'année, on verra aisément que pendant l'autre moitié, les choses se passeront dans un ordre symétriquement inverse. A l'Équinoxe d'Automne, égalité de durée des jours et des nuits, par toute la Terre. L'automne et l'hiver de l'hémisphère boréal seront le printemps et l'été de l'hémisphère austral. Les mêmes inégalités dans la durée relative de la nuit et du jour se représenteront aussi : la seule différence proviendra de l'inégalité de durée des saisons symétriques dans les deux hémisphères[1].

1. Le Solstice d'été ou de juin est l'époque des plus longues journées de

Un mot maintenant de cette inégalité des saisons.

Répétons une fois encore que l'orbite de la Terre n'est pas un cercle, mais une ellipse, et que le Soleil n'est pas à son centre, mais à l'un des foyers. De plus, le grand diamètre de

l'hémisphère boréal de la Terre, et par conséquent celle des plus courtes nuits : c'est en même temps, pour l'hémisphère austral, l'époque des plus longues nuits et des plus courtes journées. L'inverse a lieu, cela se comprend de soi, pour le Solstice d'hiver ou de décembre.

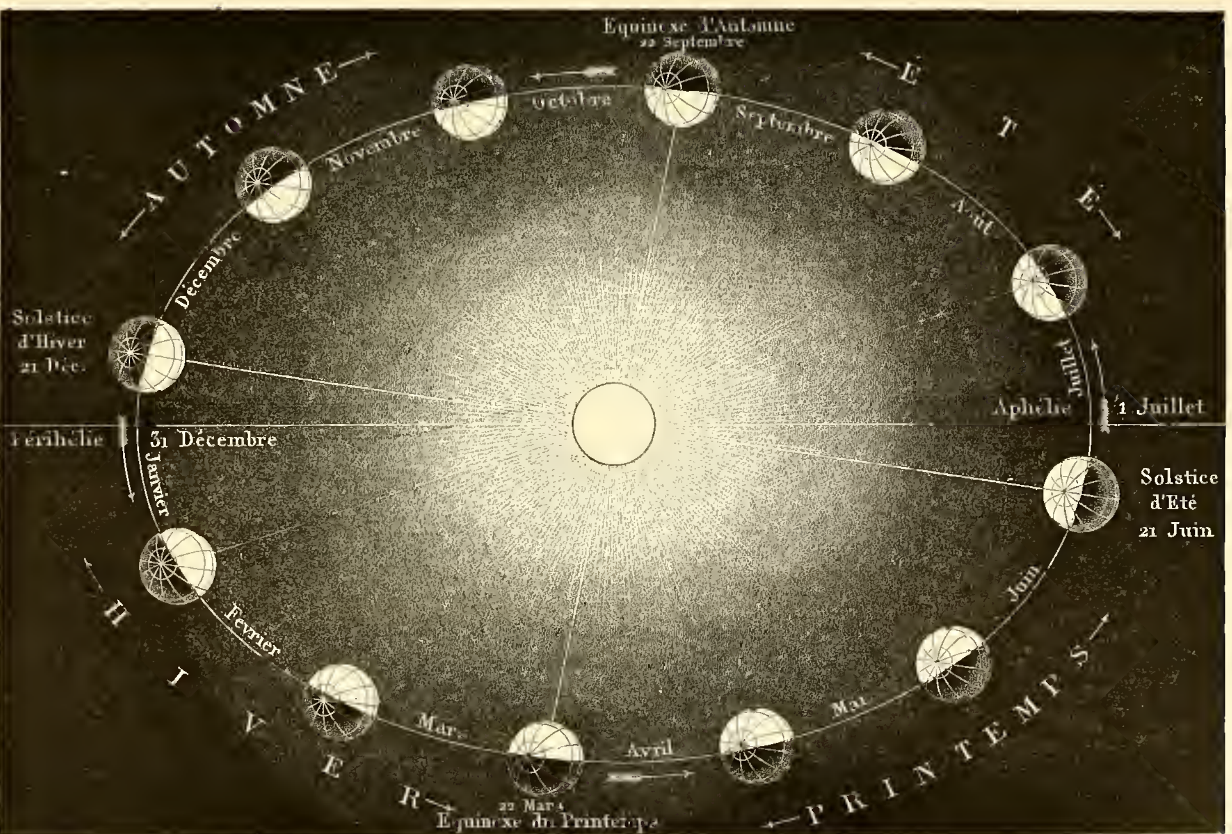
Voici, du reste, un tableau des durées relatives du jour et de la nuit, pour l'époque des Solstices, à diverses latitudes de la Terre.

Latitudes.	Durée de la journée la plus longue, ou de la plus longue nuit.			Durée de la nuit la plus courte, ou du jour le plus court.		
0° ou Équateur	12h	0m	0s	12h	0m	0s
15°	12	53	25	11	6	35
23° 27′ Tropiques	13	26	45	10	33	14
30°	13	56	4	10	3	56
45°	15	25	42	8	34	18
60°	18	29	42	5	3	18
66° 33′ Cercles polaires	24	0	0	0	0	0

Voici maintenant les mêmes durées calculées de degré en degré pour les lieux dont les latitudes sont égales à celles des principales régions de la France :

42°	15h	4m	0s	8h	56m	0s
43°	15	11	0	8	49	0
44°	15	14	10	8	45	50
45°	15	25	42	8	34	18
46°	15	33	35	8	26	25
47°	15	41	49	8	18	11
48°	15	51	2	8	8	58
49°	15	55	32	8	4	28
50°	16	9	5	7	50	55
51°	16	19	15	7	40	45

Enfin, aux latitudes polaires de 70°, 75°, 80°, le Soleil reste levé pendant 64, 104 et 134 jours de 24 heures; il reste couché pendant les mêmes durées dans les saisons opposées. A 85°, la durée du plus long jour et de la plus longue nuit est de 160 jours. Par exemple, dans l'hémisphère boréal, le Soleil apparaît à cette latitude, pour la première fois, le 8 mars ; jusqu'au 3 avril, la journée va en augmentant progressivement de durée, et à partir de cette date, il ne se couche plus jusqu'au 10 septembre; puis il se couche de nouveau, et jusqu'au 5 octobre, il y a une succession de journées et de



LES SAISONS TERRESTRES

Périhélie et aphélie. — Équinoxes et solstices.

l'Écliptique — c'est le nom astronomique de l'orbite de la Terre — ne passe pas exactement par les Solstices. Dans la figure 105, ces différences ont été exagérées à dessein. On y voit tout de suite que l'Hiver boréal doit être la plus courte et

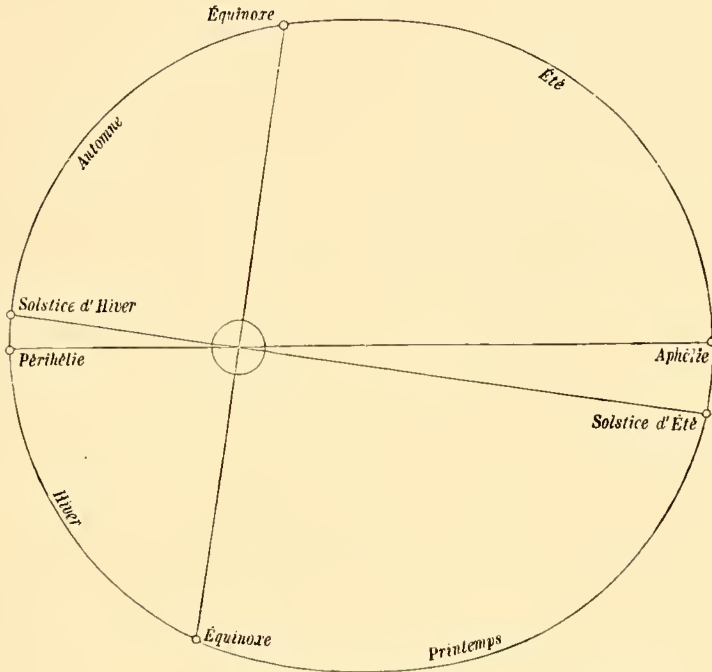


Fig. 105. Orbite de la Terre. — Inégalité de durée des saisons.

l'Été la plus longue des quatre saisons : les deux autres saisons sont de durées intermédiaires, et c'est le Printemps boréal qui est la plus longue des deux.

nuits. A partir de cette dernière époque, le Soleil disparaît de nouveau complétement pendant une période de 160 jours.

Il ne faut pas oublier que les heures du lever et du coucher du Soleil calculées dans le tableau précédent, sont celles de l'apparition et de la disparition de son centre au-dessus et au-dessous d'un horizon qui serait celui du niveau de la mer; il n'est d'ailleurs pas tenu compte de la réfraction atmosphérique, qui le fait lever plus tôt et coucher plus tard. La durée de la nuit comprend celle du crépuscule du matin et du soir, qui prolonge la clarté du jour au point qu'à la latitude de Paris, le jour du Solstice d'été, il n'y a presque pas de nuit complète ; dans les régions polaires, le crépuscule atténue et abrége aussi considérablement les ténèbres de leurs longues nuits.

Ce que nous disons là serait vrai, par le fait seul de l'inégalité des arcs parcourus par la Terre, alors même qu'elle décrirait avec une vitesse constante toutes les portions de son orbite. Mais l'inégalité de durée des saisons est encore accrue d'une autre manière. Nous avons déjà vu que chacune des planètes se meut autour du Soleil avec une vitesse variable, d'autant plus rapide, qu'elle est plus rapprochée du foyer commun. La Terre, dont le périhélie tombe vers le 1er janvier, et l'aphélie vers le 1er juillet, se meut donc moins vite pendant les saisons hivernales de l'hémisphère nord, que pendant les saisons estivales : ce qui, je le répète, doit contribuer encore à l'inégalité de durée de ces périodes.

Voici les durées moyennes des saisons, dans l'ordre où nous les avons parcourues :

	Jours.		Jours.
Printemps.	92,9	Automne.	89,7
Été	93,6	Hiver.	89,0

Les deux premières saisons ne diffèrent entre elles, comme les deux autres, que des sept dixièmes d'un jour, c'est-à-dire de 16 à 17 heures. Mais le Printemps surpasse l'Automne de 3 jours, 2 dixièmes, et l'Été est plus long que l'Hiver de 4 jours, 6 dixièmes. Ces différences d'ailleurs varient légèrement d'une année à l'autre[1].

C'est aux extrémités du grand diamètre de son orbite que la Terre s'éloigne et se rapproche le plus du Soleil. Elle se trouve ainsi à sa distance maximum ou *aphélie* (37 950 000 lieues), dans les premiers jours de juillet, et à sa distance minimum ou *périhélie* (36 400 000 lieues), quelques jours après le Solstice d'Hiver, le 31 décembre ou le 1er janvier

1. Dans 47 siècles environ, le déplacement du périhélie dont nous avons parlé plus haut (page 310), aura amené ce point à coïncider avec l'équinoxe du printemps. Alors le printemps et l'été réunis auront même durée que l'automne et l'hiver. De plus, l'hiver sera égal au printemps, et la durée de l'automne égale à celle de l'été.

environ (distance moyenne, au 1[er] avril et au 2 octobre). Le Soleil est donc plus loin de la Terre, pendant les saisons de Printemps et d'Été, que pendant les saisons d'Automne et d'Hiver de l'hémisphère boréal. Cette circonstance prouve que ce n'est pas à la diminution de la distance réelle du Soleil qu'il faut attribuer l'augmentation de la chaleur ou plutôt de la température d'un lieu de la Terre. Les variations des saisons météorologiques ont pour causes principales, d'une part l'obliquité de l'écliptique ou l'inclinaison de l'axe de rotation sur l'orbite, d'autre part les inégalités de durée, que l'excentricité de l'orbite terrestre et la variation de vitesse de la Terre occasionnent dans les saisons successives.

Pendant le Printemps et l'Été de l'hémisphère boréal, le Soleil séjourne sur l'horizon d'un lieu plus longtemps qu'en Automne et en Hiver : la durée de la journée dépasse d'autant plus celle de la nuit, qu'on est plus rapproché du Solstice. C'est là une première raison de l'élévation de température, pendant les saisons estivales ; à cette raison vient se joindre la plus grande durée de ces saisons, causée elle-même par l'excentricité de l'orbite terrestre et par l'inégalité de vitesse de notre planète, conséquence de cette même excentricité. Une autre cause non moins puissante provient de la hauteur apparente du Soleil. L'arc diurne décrit par l'astre radieux s'élève à des hauteurs croissantes, de l'Équinoxe du Printemps au Solstice d'Été, pourrepasser en sens inverse par les mêmes positions, du Solstice d'Été à l'Équinoxe d'Automne. Les rayons qu'il envoie sur les divers points de l'hémisphère boréal, y traversent l'atmosphère moins obliquement qu'en Hiver et en Automne ; et l'intensité de la chaleur reçue est d'autant plus forte, que cette obliquité est moindre, circonstance aisée à expliquer par la moindre épaisseur des couches atmosphériques que traversent ces rayons. D'ailleurs, abstraction faite de l'atmosphère, l'obliquité dont nous parlons est déjà cause que la chaleur reçue par une même étendue de la surface ter-

restre est d'autant moins considérable, que la hauteur du Soleil sur chaque horizon est elle-même moins grande. Or, la variation des hauteurs méridiennes du Soleil suivant les saisons, a pour cause première l'obliquité de l'écliptique, ou l'inclinaison de l'axe de rotation de notre globe sur le plan de son orbite.

Les explications qui précèdent s'appliquent à l'hémisphère austral, pendant les saisons d'Automne et d'Hiver de l'hémisphère boréal, lesquelles sont pour lui le Printemps et l'Été. Et comme le Soleil y est en outre à une moindre distance de la Terre, l'intensité de la radiation de l'astre y est plus grande encore : comme aussi, dans les saisons hivernales du même hémisphère, le froid doit être plus intense. En somme, il paraît que ces inégalités se compensent, et les températures moyennes de l'année sont à peu près les mêmes au nord et au sud de l'Équateur.

Il ne s'agit, dans tout ce qui précède, que des influences purement astronomiques; nous avons dû faire abstraction des mille causes qui, suivant les lieux, modifient ces données générales, et font du climat la résultante d'une série d'éléments divers. En restant au même point de vue, il est facile aussi de comprendre pourquoi les époques des maximum de chaleur et de froid ne tombent pas aux Solstices mêmes, mais quelque temps après, en juillet et en janvier. A partir du 20 juin en effet, l'hémisphère boréal, déjà échauffé par les journées de printemps, continue à recevoir du Soleil, pendant le jour, plus de chaleur qu'il n'en perd pendant la nuit : sa température s'accroît encore. Au contraire, après le 21 décembre, les mêmes régions, déjà refroidies par les longues nuits de l'automne, continuent à se refroidir, parce qu'elles perdent plus de chaleur par rayonnement pendant la nuit, qu'elles n'en reçoivent pendant la journée.

Du reste, les saisons sont bien différentes pour tous les

points d'un même hémisphère : de l'Équateur à l'un et à l'autre Pôle, on passe, par degrés insensibles, d'une chaleur intense à un froid extrême. On peut distinguer néanmoins sur la surface du globe terrestre cinq zones ou climats, qui se succèdent dans l'ordre suivant :

La *zone torride*, qui comprend, au nord et au sud de l'Équateur, tous les pays où le Soleil monte deux fois par an jusqu'au zénith ; elle est bornée par les tropiques, cercles parallèles à l'Équateur, menés à $23^{\circ}27'$ de latitude septentrionale ou méridionale ;

Les deux *zones tempérées*, qui s'étendent de part et d'autre des tropiques, jusqu'à une latitude de $66^{\circ}33'$, c'est-à-dire jusqu'aux cercles polaires; pour tous les pays compris dans ces zones, le Soleil ne s'élève jamais jusqu'au zénith, sauf aux tropiques mêmes, et la limite de ses plus faibles hauteurs méridiennes y est comprise entre $43^{\circ}6'$ et l'horizon ;

Enfin, les deux *zones glaciales* ou circumpolaires, entre les latitudes de $66^{\circ}33'$ et les pôles. Là, le Soleil s'abaisse jusqu'à l'horizon et disparaît même au-dessous, pendant des temps qui varient entre un jour et six mois. Il ne s'y élève jamais à plus de $46^{\circ}54'$, et aux pôles mêmes, la hauteur maximum est moitié moindre.

Les étendues superficielles de ces zones sont très-inégales : la zone torride embrasse les 40 centièmes de la surface totale du sphéroïde terrestre ; les deux zones tempérées, les 52 centièmes, et enfin les deux zones glaciales, les 8 centièmes. Ainsi les deux zones tempérées, les plus favorables à l'habitabilité humaine et au développement de la vie civilisée, forment plus de la moitié de l'étendue de la Terre ; les zones glaciales, pour ainsi dire inhabitables, en forment une fraction très-petite. Dans ces nombres, les terres et les eaux sont d'ailleurs confondues.

Les phénomènes que nous venons d'étudier se rattachent tous directement à la rotation de la Terre et à son mouvement annuel de translation dans l'espace. La durée de cette rota-

tion ou du jour sidéral, l'inclinaison et le parallélisme de l'axe, la durée de l'année, la forme de l'orbite, ses dimensions réelles sont autant d'éléments qui se combinent pour produire les phénomènes dont nous parlons, dans l'ordre même que l'observation constate. Si tous, ou certains d'entre eux venaient à changer, les jours et les nuits, les saisons et les climats changeraient aussi, et les conséquences qui en résulteraient pour les conditions de la vie sur notre planète détermineraient certainement chez les êtres organisés, soit subitement, soit à la longue, de profondes modifications.

Déjà, à la vérité, nous avons vu que la durée du jour sidéral peut être considérée comme invariable. Il en est de même de l'année : l'excentricité et l'obliquité de l'écliptique seuls changent lentement ; mais si la forme de l'orbite terrestre et l'inclinaison de l'axe de rotation varient insensiblement, la variabilité périodique de ces éléments se trouve contenue entre d'étroites limites. Enfin la source de la lumière et de la chaleur, le Soleil, foyer de la vie du globe terrestre et des autres planètes, voit sans doute diminuer peu à peu l'intensité de ses radiations ; mais le calcul a prouvé qu'il faudrait des millions d'années avant que cet affaiblissement pût modifier sensiblement les climats terrestres. Ainsi donc, à moins de catastrophes imprévues et improbables, les conditions astronomiques de notre planète pourront être, pendant de bien longues périodes de temps, considérées comme invariables.

IV

LA LUNE ☾.

§ 1. ASPECT A L'ŒIL NU; PHASES. — MOUVEMENT PROPRE.

Avant de quitter la Terre pour aborder Mars, la première planète qu'on rencontre en continuant à s'éloigner du Soleil, nous aurons à faire une station assez longue dans le voisinage de notre planète. Pour parler le langage des marins, nous devons rester encore dans les eaux de la Terre, et l'astre que nous voulons étudier et visiter ne nous fera point sortir des régions du ciel que nous habitons.

La Lune, en effet, est un satellite de la Terre. Ce n'est point, comme le disaient les astronomes des derniers siècles, une planète, du moins dans le sens que nous attachons aujourd'hui à ce mot. Elle se meut aussi, il est vrai, autour du Soleil; mais ce mouvement n'est pas direct; il est subordonné à celui qu'elle effectue autour de nous, de sorte que c'est la Terre qui est le réel foyer de l'orbite lunaire. La Terre et la Lune forment un système à part, un monde particulier dans le monde solaire, d'autant plus intéressant à étudier que nous allons bientôt rencontrer, en visitant les grosses planètes, d'autres systèmes secondaires de même nature, quoique plus compliqués encore.

Commençons par l'étude des mouvements apparents de la Lune et des aspects qu'elle nous présente dans le cours de ces mouvements.

Comme le Soleil, comme les planètes et toutes les étoiles, la Lune est entraînée d'Orient en Occident par le mouvement diurne : elle se lève, monte plus ou moins haut jusqu'au méridien et se couche chaque jour, pour reparaître à l'Orient le jour d'après. C'est l'effet commun de la rotation de la Terre. Mais un mouvement propre, de sens contraire au mouvement diurne, lui fait parcourir très-rapidement d'Occident en Orient les diverses constellations. Ce second mouvement est réel, appartient à la Lune elle-même, et n'est autre chose que la manifestation de sa circulation périodique autour de notre globe.



Fig. 106. Mouvement propre du disque lunaire sur la voûte céleste.

Rien de plus aisé à constater que le mouvement propre de la Lune. Il est analogue à celui du Soleil, mais beaucoup plus rapide, et comme l'illumination de la voûte céleste par la lumière lunaire n'est pas assez intense pour effacer les étoiles des premières grandeurs, on peut constater le déplacement du disque, pendant le cours d'une même nuit, dans l'intervalle de quelques heures. Qu'on note, en effet (fig. 106 et 107), la position que le disque de la Lune occupe à un instant donné, au milieu des étoiles d'une constellation; qu'on évalue approximativement sa distance à l'une de ces étoiles. Au bout de peu de temps, on s'apercevra que cette distance a notablement varié, qu'elle a augmenté ou diminué selon que l'étoile de comparaison se trouvait à l'Occident ou à l'Orient de la Lune.

Des mesures précises prouveraient que ce déplacement n'a pas toujours la même rapidité; mais en moyenne, on le trouve égal à 1976″.5 ou à 33′ environ par heure. En 24 heures, il

dépasse 13° (13° 10′ 35″), c'est-à-dire qu'il est plus de treize fois aussi rapide que le mouvement propre apparent du Soleil. Au bout de 27 jours $^1/_3$ environ, la Lune parcourt successivement toutes les constellations d'un grand cercle de la sphère, fait le tour entier du ciel, après quoi elle recommence, et ainsi de suite indéfiniment. On va voir bientôt que ce mouvement propre du disque lunaire s'explique de la façon la plus simple, en admettant, ainsi que nous l'avons dit plus haut, que la Lune se meut autour de la Terre, d'Occident en Orient,



Fig. 107. Marche de la Lune à travers les constellations, dans l'intervalle d'un jour, du 28 juin 1876 à midi, au 29 juin à midi.

pendant que notre planète marche elle-même, et dans le même sens, autour du Soleil. Cette circulation continue rend également compte de la succession des phases, que tout le monde connaît, mais que nous allons néanmoins décrire succinctement, pour en noter d'une façon précise les diverses particularités.

On sait qu'il y a *Nouvelle Lune*, lorsque notre satellite n'est plus visible, ni pendant le jour ni pendant la nuit. C'est qu'alors la Lune occupe dans le ciel une position voisine du

lieu du Soleil; elle tourne vers nous son hémisphère obscur, rendu par cela même invisible, et d'ailleurs perdu dans les rayons solaires. Un intervalle de deux à quatre jours s'écoule entre la disparition de la Lune le matin, à l'Orient, et sa réapparition à l'Occident, le soir, un peu après le coucher du Soleil : c'est au milieu de cet intervalle qu'est l'instant précis de la Lune nouvelle, et c'est à partir de cette position qu'elle se dégage peu à peu des rayons solaires. On la voit d'abord (pl. XIV) sous la forme d'un croissant très-délié, dont la convexité est tournée vers le point où se trouve le Soleil, au-dessous de l'horizon; en ce moment, on aperçoit très-distinctement toute la partie obscure du disque de la Lune, dont la teinte légère et comme transparente est connue sous le nom de *lumière cendrée*. Entraîné par le mouvement diurne, l'astre se couche bientôt à l'horizon. Le lendemain, le même phénomène se reproduit : mais déjà le croissant est moins délié, la partie lumineuse plus large, et la Lune, un peu plus éloignée du Soleil, se couche aussi un peu plus tard que la veille.

Le quatrième jour après la *Nouvelle Lune*, la forme et l'apparence de notre satellite, qui passe au méridien trois heures après le Soleil, est celle qu'on a représentée dans le 2e dessin de la planche XIV. La lumière cendrée est encore très-sensible, bien qu'elle diminue de plus en plus, pour disparaître tout à fait à la phase suivante, à celle qu'on nomme le *Premier Quartier* : alors, entre le septième et le huitième jour de la Lune son disque se montre sous la forme d'un demi-cercle, en partie visible pendant le jour, et que le mouvement diurne n'amène au méridien que six heures environ après le passage du Soleil : on dit alors qu'elle est *dichotome* (divisée en deux parties égales). Déjà, dans la phase précédente, les taches dont le disque de la Lune est parsemé étaient visibles. En ce moment, ces taches se distinguent avec une grande netteté sur le demi-cercle lumineux.



LES PHASES DE LA LUNE

Entre le premier quartier et la *Pleine Lune*, sept jours s'écoulent de nouveau, pendant lesquels la forme de la partie éclairée approche de plus en plus d'être celle d'un cercle complet, la Lune se levant et se couchant de plus en plus tard, mais tournant toujours vers l'Occident la partie circulaire de son disque. Enfin, elle nous montre entièrement sa partie éclairée quinze jours environ après la nouvelle Lune; alors c'est à minuit qu'elle parvient au plus haut de sa course, en langage astronomique, qu'elle passe au méridien : au même instant le Soleil lui-même passe sous l'horizon au méridien inférieur; de sorte que, relativement à la Terre, la Lune est précisément à l'opposé du Soleil.

Depuis l'époque de la Pleine Lune jusqu'à la Nouvelle Lune suivante — cette seconde moitié de la période des phases se nomme le *décours* — la forme circulaire de la partie éclairée du disque décroît progressivement et finit par se présenter comme au début de sa marche, sous la forme d'un croissant fort délié (fig. 108). Mais pendant cette période, c'est vers l'Orient que la convexité sera désormais tournée, de sorte que c'est toujours du côté du Soleil que regarde le demi-cercle terminant la portion éclairée. Au milieu de l'intervalle qui sépare la Pleine Lune de la période suivante, le *Dernier Quartier* donne une phase (dichotome) semblable au *Premier Quartier*, mais inversement située.

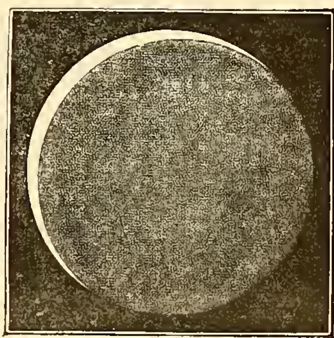


Fig. 108. Dernière phase de la Lune. Lumière cendrée.

Dans cette seconde partie de la période des phases lunaires ou de la *Lunaison*, la position apparente de la Lune dans le ciel se rapproche de plus en plus de celle du Soleil. Vers les derniers jours, elle précède de très-peu son lever, jusqu'à ce qu'elle se confonde de nouveau dans les rayons solaires, pour

disparaître et ramener une Lune nouvelle, origine d'une nouvelle lunaison. La lumière cendrée est d'ailleurs redevenue progressivement visible, après le dernier comme avant le premier quartier, au fur et à mesure de la diminution de la portion éclairée du disque.

Ces divers phénomènes bien constatés, il est aisé d'en donner l'explication par le seul fait de la circulation périodique de la Lune autour de la Terre.

Il est d'abord bien évident que si cet astre était immobile, relativement à notre globe, son disque entraîné seulement par le commun mouvement diurne, correspondrait toujours aux mêmes étoiles, en un mot ne se déplacerait pas sur la voûte étoilée. La Lune se meut donc, et le sens de ce mouvement ne peut être que celui d'Occident en Orient, puisque son disque correspond successivement à des étoiles de plus en plus orientales. Comme d'ailleurs, ainsi que nous l'avons constaté plus haut, elle met 27 jours $^1/_3$ environ à revenir à la même position, à la même étoile, ou pour parler plus exactement à la même longitude céleste, c'est que telle est, en effet, la durée de sa révolution sidérale. La durée exacte de cette révolution est 27 jours 7 heures 43 minutes et 11.5 secondes.

Voyons maintenant comment le même mouvement, combiné avec la translation de la Terre, rend compte des phases lunaires, de leur succession et de leur périodicité. Pour cela, considérons d'abord un instant la Terre comme immobile. Partons du point où le Soleil et la Lune ont tous deux même longitude. La Lune se trouve alors (fig. 109) dans la direction de la ligne qui joint le centre de la Terre au centre du Soleil. Elle tourne donc vers nous son hémisphère obscur, elle est invisible : c'est l'époque de la Nouvelle Lune ou de la *conjonction*. Dans les positions suivantes, la Lune s'éloigne du Soleil, son disque se dégage peu à peu de ses rayons et, par le fait, nous montre des portions de plus en plus grandes

de son hémisphère éclairé, d'abord sous la forme d'un croissant, puis, au premier quartier, d'un demi-cercle, et plus loin d'un disque qui approche de plus en plus d'un cercle complet. La Lune arrive à l'opposé du Soleil : c'est l'époque de la

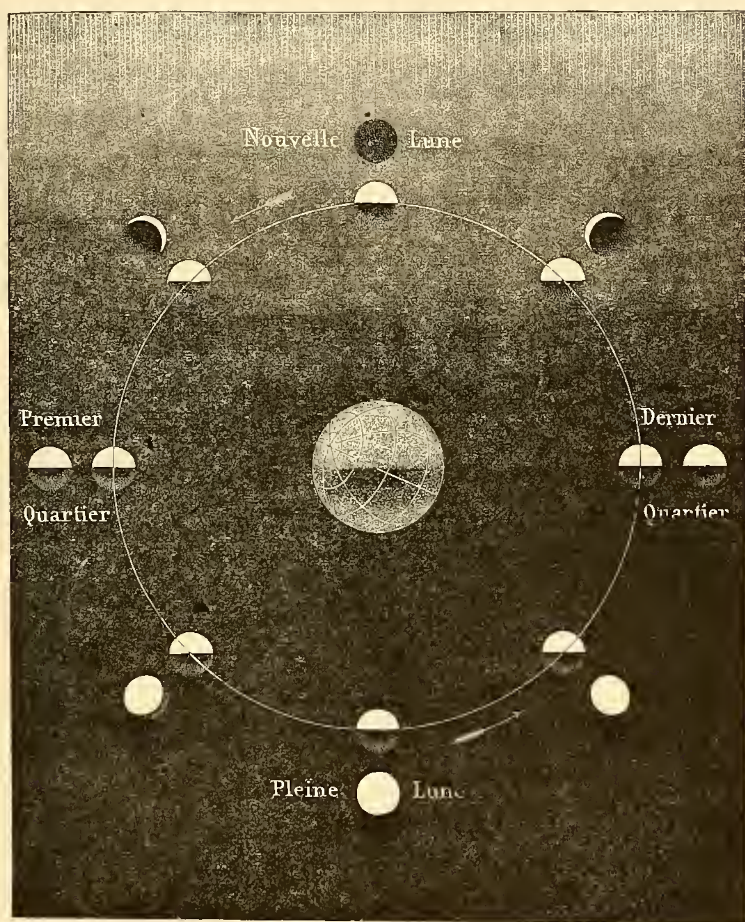


Fig. 109. Positions relatives de la Terre et de la Lune, pendant le cours d'une lunaison. Explication des phases.

pleine Lune ou de l'*opposition* (leurs longitudes diffèrent de 180°). Dans la seconde moitié de son orbite, la Lune va évidemment reprendre les mêmes apparences dans un ordre inverse ; mais, tandis que le bord circulaire était tourné vers l'Occident dans la première moitié de la révolution, on voit

que, dans la seconde moitié, c'est au contraire vers l'Orient qu'il est tourné ; il est encore du côté du Soleil.

La *conjonction* et l'*opposition* reçoivent la dénomination commune de *syzygies;* le premier et le dernier quartiers se nomment les *quadratures*, et les quatre phases intermédiaires sont les *octants*. La durée exacte de la Lunaison, ou de l'intervalle entre deux *Nouvelles Lunes* consécutives, est de 29 jours, 12 heures, 44 minutes et 3 secondes. On appelle *révolution synodique* le mouvement qui ramène la Lune dans deux positions identiques, relativement au Soleil et à la Terre : mouvement dont la durée est par conséquent celle de la lunaison. On va voir qu'il y a lieu de distinguer entre la révolution synodique et la révolution sidérale. En effet, tandis que la révolution sidérale s'accomplit en 27 jours 8 heures environ, la révolution synodique dure près de 29 jours 13 heures ; celle-ci est donc plus longue que l'autre de 2 jours et 5 heures, à peu de chose près. D'où vient cette différence entre deux périodes qu'un premier examen nous a fait voir produites l'une et l'autre par le même phénomène, c'est-à-dire par le mouvement de circulation de la Lune autour de la Terre ? On va le comprendre aisément.

Pour constater et mesurer la durée de la révolution sidérale lunaire, qu'avons-nous fait ? Nous avons pris pour point de repère le point où aboutit sur la voûte céleste le rayon vecteur qui joint idéalement les deux centres de notre globe et de son satellite. Soit TL (fig. 110) ce rayon vecteur que nous prenons à l'instant où la Lune est en conjonction, où elle a même longitude que le Soleil, c'est-à-dire où les centres de la Terre, de la Lune et du Soleil sont dans un même plan perpendiculaire à l'Écliptique. A partir de ce moment, la Terre, que pour simplifier nous avions considérée d'abord comme immobile, se déplace sur son orbite ; au bout de 27 jours 7 heures, elle est en T'. Le rayon vecteur a la position T'L' parallèle à TL, dès lors aboutissant à la même étoile,

parce que les étoiles sont si éloignées de notre système, que leur distance est comme infinie relativement à la distance parcourue simultanément par la Lune et par la Terre. La Lune a donc, en ce moment, achevé sa révolution ; son rayon vecteur, ou sa projection sur le plan de l'Écliptique, a décrit un angle de 360°, une circonférence entière. Mais la position des deux astres, relativement au Soleil, est-elle la même qu'au début? Non, évidemment. La Terre a parcouru dans l'intervalle un certain arc sur son orbite, arc concave rapporté au Soleil. La Lune n'est point encore revenue en conjonction ; la

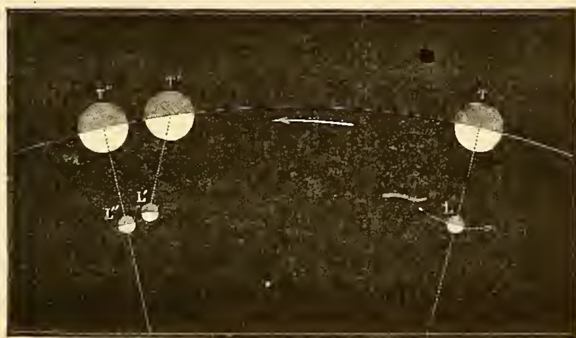


Fig. 110. Différence de durée de la révolution synodique et de la révolution sidérale.

révolution synodique n'est donc point achevée : il faut que le rayon vecteur T'L' tourne encore d'une certaine quantité ; et quand il sera dans la position T'' L'', aboutissant de nouveau au Soleil ou du moins à un point de même longitude, la figure montre que la valeur de cet angle supplémentaire sera précisément la même que celle de l'angle total décrit par notre planète depuis la conjonction antérieure. Or un calcul simple montre qu'il faut précisément à la Terre pour parcourir l'arc T'T'', 2 jours 5 heures, etc., c'est-à-dire la différence de durée des révolutions synodique et sidérale.

Ainsi, pendant que la Terre se meut autour du Soleil, la Lune la suit, en décrivant elle-même autour de notre planète

une série de courbes, dont chacune se trouve accomplie pendant la période de temps nommée révolution sidérale ; l'une quelconque de ces courbes successives constitue l'orbite lunaire. Voyons maintenant quels sont la forme, les dimensions et les autres éléments de cette orbite.

§ 2. ORBITE DE LA LUNE. DISTANCES A LA TERRE.

Faisons encore abstraction du mouvement de translation de la Terre autour du Soleil; considérons un instant notre planète comme immobile, et voyons quels sont les éléments de l'orbite que, dans cette hypothèse, la Lune décrit autour d'elle.

Nous connaissons déjà la durée de la révolution, qui est de 27 jours moyens, 7 heures 43 minutes et 11 secondes et demie ($27^{j.m.}$ 22 166 14).

La courbe décrite par notre satellite n'est pas plane, mais on peut la considérer comme telle dans une première et grossière approximation. On reconnaît alors que son plan ne coïncide point avec le plan de l'écliptique, et que leur inclinaison mutuelle est d'un peu plus de 5° (en moyenne, 5° 8′ 47″ 9). La Lune, dans chacune de ses révolutions, se trouve donc tantôt au-dessus ou au nord, tantôt au-dessous ou au sud de l'écliptique, qu'elle traverse ainsi deux fois, en des points qui sont ses *nœuds :* le *nœud ascendant* correspondant au passage du sud au nord, le *nœud descendant* au passage opposé, du nord au sud. On verra plus loin que la position des nœuds, qui ne sont d'ailleurs pas diamétralement opposés, varie d'une révolution à l'autre.

Mais quelle est la forme de l'orbite lunaire? C'est celle d'une ellipse dont le centre de la Terre occupe un des foyers, et dont l'excentricité est égale à 0.054908. La distance de la Lune varie donc pendant tout le cours de sa révolution, et l'on peut s'en assurer en mesurant les dimensions du diamètre

apparent de son disque, dont les variations sont inverses de celles de ses distances à la Terre. Quand la Lune occupe l'extrémité du grand axe la plus voisine du foyer, sa distance à la Terre est minimum; elle est alors au *périgée*, et son diamètre a sa plus grande valeur. A l'autre extrémité du même axe, ou à l'apogée, la distance est au contraire la plus grande de toutes et le diamètre est minimum; enfin à chacune des extrémités du petit axe, la distance est moyenne entre les extrêmes, et il en est de même de la valeur angulaire du diamètre du disque. La figure 111 montre les dimensions

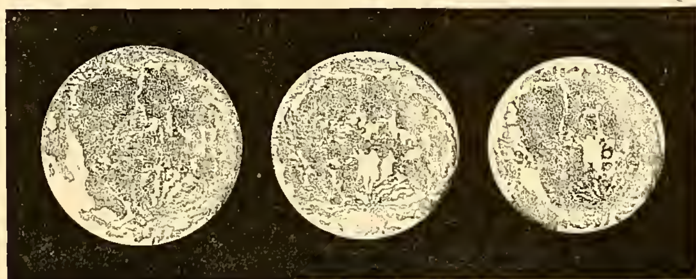


Fig. 111. La Lune au périgée, à sa distance moyenne et à l'apogée. Dimensions apparentes relatives du disque.

apparentes de la Lune à ces diverses distances, et voici le tableau qui les donne les unes et les autres :

	Diamètres de la Lune.	Distances à la Terre.
A l'apogée.	29′31″.0	1.0549
A la distance moyenne	31′ 8″.2	1.0000
Au périgée	32′56″.7	0.9451

Il résulte de ces nombres que la plus grande distance de la Lune surpasse la plus petite, de la neuvième partie environ de cette dernière, ou du dixième de la distance moyenne.

Les données ou éléments de l'orbite lunaire que nous venons d'indiquer sont d'ailleurs variables. Le mouvement de la Lune autour de la Terre est, en effet, sujet à de nombreuses inégalités ou perturbations, que la proximité de l'astre a per-

mis de constater depuis longtemps, et dont les causes physiques, se rattachant toutes aux actions combinées de la Terre et du Soleil, se ramènent au principe de la gravitation universelle. La forme, les dimensions, la position et l'inclinaison de l'orbite en sont également affectées. Nous nous bornerons à dire quelques mots de la rétrogradation des nœuds de la Lune et du mouvement de son périgée.

Voici sommairement en quoi consiste la rétrogradation des nœuds.

Soit T la position de la Terre, EE le plan de l'écliptique et N le nœud ascendant de la Lune à l'une quelconque de ses révolutions. L'astre parcourt l'orbite de droite à gauche, dans le sens des flèches de la figure. Si l'orbite était réellement plane, la Lune irait couper l'écliptique sur le prolongement du rayon vecteur NT et n serait son nœud descendant. Or, en réalité, le nœud descendant est en n', en arrière du point n dans le sens du mouvement. De même, le nœud ascendant suivant, au lieu d'être en N et de coïncider avec le précédent, ou même en N_1 sur le prolongement du rayon vecteur n' T, est encore en arrière de ce dernier point, en N'. Le même phénomène se reproduit d'une révolution à la suivante. On voit donc que les nœuds lunaires rétrogradent sur l'écliptique, et l'observation prouve qu'en moyenne cette rétrogradation est de $1^{\circ}\,27'$ par révolution. Ce mouvement ayant toujours lieu dans le même sens, il arrive qu'au bout de $6793^{j}.39$, qui font 18 ans $\frac{2}{3}$ environ ou 249 révolutions lunaires, le nœud ascendant de la Lune se trouve revenu au point de départ. Les choses se passent comme si le plan supposé de

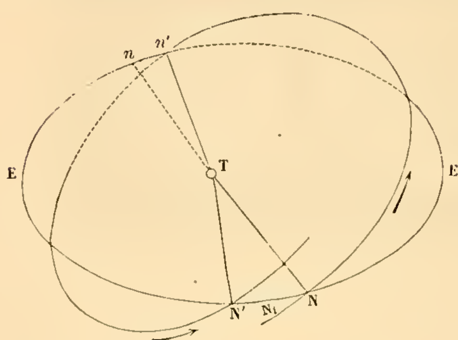


Fig. 112. Rétrogradation des nœuds de la Lune.

l'orbite lunaire se déplaçait, en conservant la même inclinaison moyenne sur le plan de l'écliptique, et décrivait en 18 années $\frac{2}{3}$ un cône autour de l'axe de ce plan. A la vérité, l'inclinaison de l'orbite varie aussi : elle s'élève ou s'abaisse de 8′ 47″

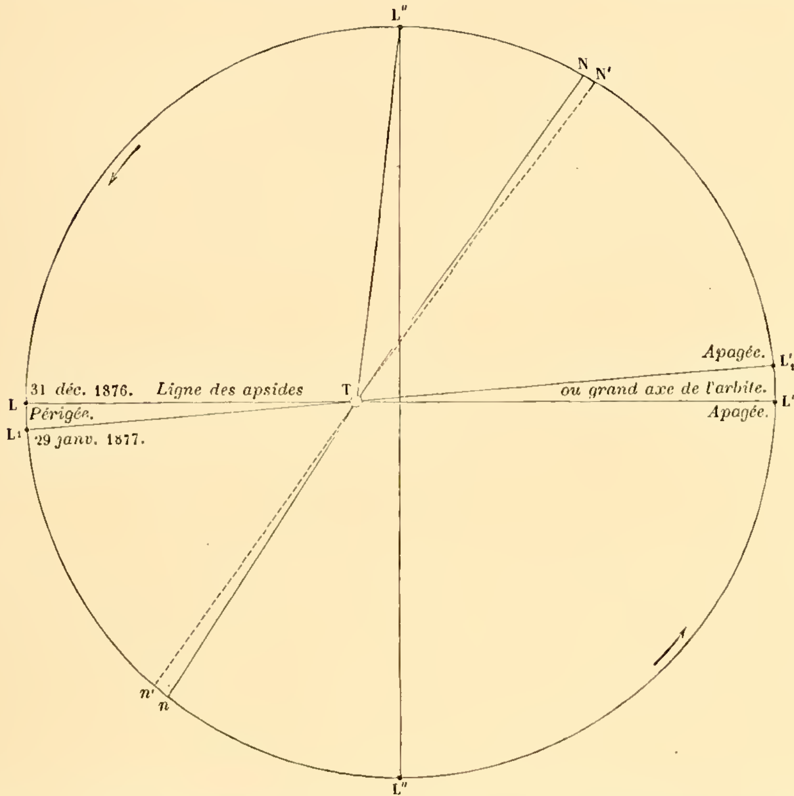


Fig. 113. Mouvement progressif du périgée de l'orbite lunaire et rétrogradation des nœuds [1].

au-dessus et au-dessous de la valeur moyenne donnée plus haut.

Disons maintenant en quoi consiste le mouvement du périgée. Soit LL′L″ (fig. 113) l'ellipse lunaire, et L la position du périgée

1. Dans la figure 113, les points n et N représentent les positions de la Lune le 7 et le 21 décembre 1876, à son nœud descendant et au nœud ascendant qui le suit; n' N′ sont les nœuds suivants, descendant et ascendant, le 4 et le 18 janvier 1877. L et L_1 marquent les positions de la Lune périgée, le 31 décembre 1876 et le 29 janvier 1877.

au début d'une révolution. Le grand axe est LTL′, et L′ indique la position actuelle de l'apogée. Quand la Lune reviendra, au bout de 27 jours 8 heures, à la même longitude, elle ne sera plus à l'extrémité du petit axe ou à sa distance minimum de la Terre; elle devra parcourir encore un arc de 3° 3′ et s'avancer en L_1 pour y parvenir. En un mot, LTL′ sera venu

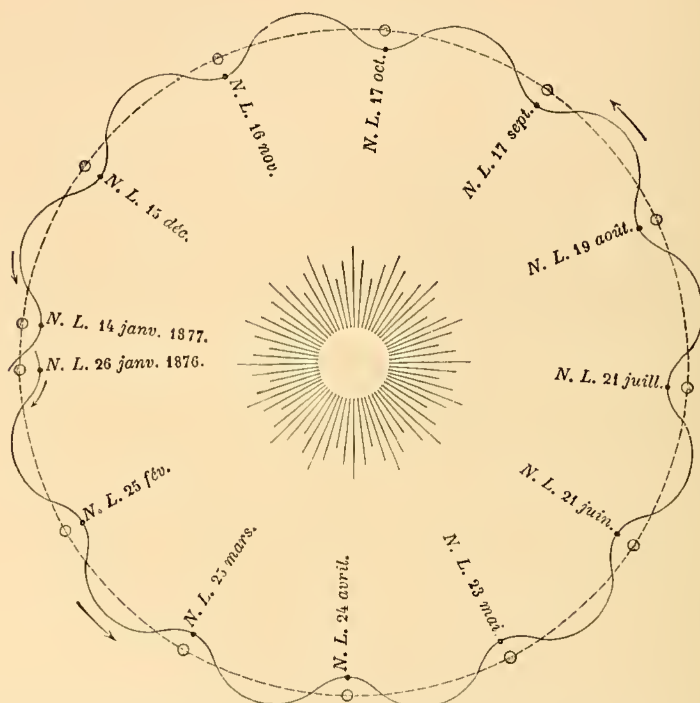


Fig. 114. Sinuosités décrites par la Lune pendant une révolution de la Terre autour du Soleil, ou une année.

se placer en $L_1TL'_1$ et par suite l'axe et le périgée se seront avancés dans le sens du mouvement. Au bout d'un peu moins de 9 ans (3232j.57), ou de 118 révolutions sidérales, le grand axe de l'orbite lunaire aura repris sa position primitive en longitude.

L'excentricité, les dimensions du grand axe, la vitesse de la Lune varient aussi en oscillant de part et d'autre de leurs valeurs moyennes, de sorte que le mouvement elliptique de notre

satellite subit constamment des variations qui ne permettent point de considérer l'orbite comme une courbe fixe, ni dans sa position, ni dans ses dimensions, ni dans sa forme.

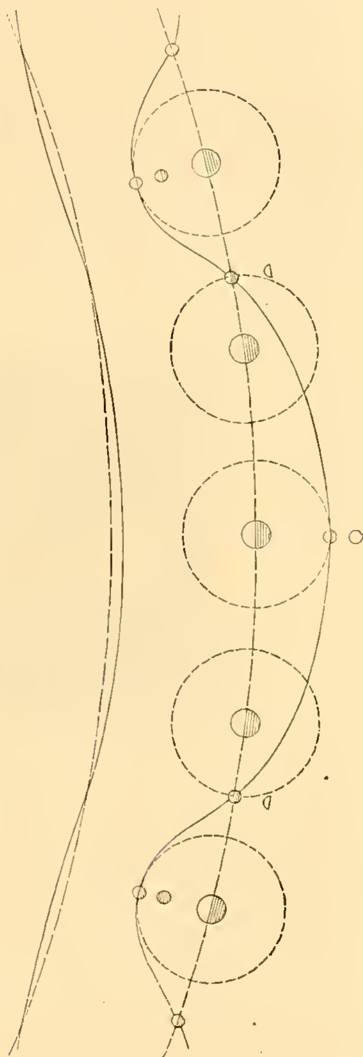


Fig. 115. Marche de la Lune dans l'espace pendant le cours d'une de ses révolutions autour de la Terre.

Dans tout ce que nous venons de dire, nous avons considéré l'orbite de la Lune relativement à la Terre, foyer de son mouvement. Si nous voulons nous représenter la courbe décrite par notre satellite dans l'intérieur du monde solaire, il faut combiner l'orbite que nous venons de définir et qui, nous l'avons vu, est une suite de spires s'enroulant et se déroulant autour d'une ligne moyenne, avec la trajectoire que la Terre décrit elle-même autour du Soleil. On trouve alors une ligne ondulée, sinueuse, dont la figure 115 représente le développement dans le cours d'une lunaison et la figure 114 pour toute une année. Les proportions des distances ne sont pas observées dans le premier dessin, non plus que dans la courbe amplifiée de la figure 115. Il faut ajouter que la courbe décrite par la Lune dans l'espace est toujours concave du côté du Soleil : elle ne présente donc pas d'inflexion comme le laissent supposer nos figures. Enfin, il ne faut pas oublier que le système solaire et, par suite,

la Terre avec la Lune sont entraînés ensemble dans l'espace : l'orbite réelle de notre planète est donc sinueuse elle-même, et c'est autour de ses sinuosités que se déroulent celles de la trajectoire de la Lune.

Un mot maintenant des réelles dimensions de l'orbite lunaire, ou, si l'on veut, des distances variables qui séparent la Terre de son satellite. Nous donnerons dans la troisième partie du Ciel une idée de la méthode qui permet de calculer ces distances, d'après l'élément qu'on nomme *parallaxe*[1].

Cet élément, rapporté au rayon de l'équateur terrestre, vaut 57′ 2″.31. C'est sous cet angle qu'un observateur posté au centre de la Lune verrait de face le rayon équatorial terrestre. On en conclut, pour les distances moyenne ou extrêmes des deux centres de la Lune et de la Terre, les nombres suivants :

		En rayons équatoriaux.	En kilomètres.	En lieues.
Distances	apogée.. . .	63.583	405 457	101 364
de la Lune	moyenne . .	60.273	384 383	96 088
à la Terre	périgée . . .	56.964	363 249	90 812

Près de 7 rayons de la Terre (6.619), ou 42 208 kilomètres, telle est la différence qui existe, dans le cours d'une révolution de la Lune, entre sa plus petite et sa plus grande distance à notre globe. Quant à sa distance moyenne, il suffit pour se la fixer dans la mémoire, de remarquer qu'elle vaut environ 30 diamètres terrestres, et qu'ainsi 30 globes égaux à la Terre, rangés en file ou en chapelet à partir du centre de notre planète, iraient aboutir au centre de son satellite.

1. La parallaxe lunaire est une quantité variable, non-seulement avec la distance de l'astre, mais aussi avec le rayon de la Terre qui forme la base du triangle. Supposons deux lignes joignant le centre de la Lune aux extrémités du rayon équatorial de notre globe, quand le centre du disque lunaire est à l'horizon même du point de l'équateur en question et dans le plan de cet

§ 3. FORME, DIMENSIONS RÉELLES DE LA LUNE. ROTATION.

La Lune est de forme sphérique ou sphéroïdale. En effet, les divers diamètres de son disque sont égaux; la partie lumineuse est toujours terminée, à l'extérieur par un arc de forme circulaire, à l'intérieur ou sur la ligne de séparation de la lumière et de l'ombre, par une moitié d'ellipse. Il faut évidemment, dans cette appréciation de la forme, tenir compte

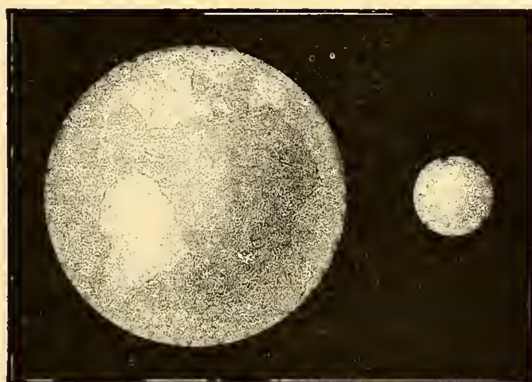


Fig. 116. La Terre et la Lune, dimensions comparées.

des inégalités ou dentelures qui proviennent des aspérités de la surface; mais on n'a pu constater, dans aucun sens, de trace d'aplatissement. Nous verrons plus loin les raisons qui font penser que la Lune est plutôt allongée dans le sens du diamètre qui joint son centre à la Terre, qu'elle est un ellipsoïde dont le grand axe est dirigé vers nous.

Nous avons dit plus haut que le diamètre moyen apparent de la Lune est égal à 31′ 8″.2, soit 1868″.2; que la parallaxe

équateur. Supposons de plus la Terre et la Lune à leur moyenne distance. L'angle à la Lune du triangle ainsi formé est alors ce qu'on nomme la *parallaxe horizontale équatoriale moyenne*. D'après Henderson, cette parallaxe vaut 57′ 2″.31.

moyenne équatoriale est 57′ 2″.31. Le double de ce dernier nombre, 114′ 4″.62, ou 6844″.62, serait donc la mesure du diamètre de l'équateur terrestre vu de la Lune. Dès lors, le rapport des deux nombres 1868″.2 et 6884″.62 est celui des diamètres de la Lune et de la Terre : on trouve de la sorte que le premier est un peu plus des $\frac{3}{11}$ du second ; ou, le diamètre de la Terre étant 1, que celui de la Lune est 0.273125. Voici du reste le tableau des diamètre, surface et volume lunaires, évalués en fonction des dimensions terrestres correspondantes et en unités métriques :

DIMENSIONS DU GLOBE LUNAIRE.

	En mesures métriques.	Terre = 1
Diamètre	3 484 kil.	0.273 125
Circonf. d'un grand cercle .	10 940 —	
Surface.	38 000 000 kil. carrés.	0.074 597
Volume.	22 150 000 000 — cubes.	0.020 374

En résumé, la surface totale du sphéroïde lunaire équivaut à quatre fois environ celle du continent européen, ou encore à l'étendue totale des deux Amériques. Comme volume, c'est



Fig. 117. La Terre et la Lune, dans leurs vrais rapports de dimensions et de distance.

la quarante-neuvième partie du globe terrestre, un peu plus du tiers de Mercure et du huitième de Mars. Enfin, il faudrait 62 400 000 globes égaux à la Lune pour combler l'intérieur de l'immense sphère solaire.

Maintenant que nous connaissons les dimensions du rayon de la Lune, nous pouvons compléter ce que nous avons dit des distances où elle se trouve de la Terre aux différents points de son orbite. Les nombres de la page 338 se rapportent, en

effet, aux centres des deux astres[1]. Pour avoir la plus courte distance, celle des deux points de leurs surfaces les plus rapprochés, il faut en retrancher la somme des rayons de la Terre et de la Lune, soit 1.273 aux nombres de la première colonne, et 8120 à ceux de la seconde :

		En rayons équatoriaux.	En kilomètres.
Plus courtes distances de la Lune à la Terre	apogée.	61.310	397 337
	moyenne. . . .	59.000	376 263
	périgée.	55.691	355 129

Ainsi, la plus petite distance à laquelle nous nous trouvons de la Lune ne dépasse guère 355 000 kilomètres, 88 780 lieues, moins de 9 fois la circonférence équatoriale de la Terre. On trouverait sans doute des marins qui, dans le cours de leurs voyages, ont parcouru un chemin aussi long, chemin que les trains express des voies ferrées franchiraient certainement en moins de trois cents jours. Supposons que l'espace qui sépare la Lune de la Terre soit entièrement rempli d'air, de manière à permettre au son de se propager d'un globe à l'autre. Si, à l'époque de la pleine Lune, une éruption volcanique avait lieu à la surface de notre satellite, le bruit de l'explosion ne nous parviendrait que 13 jours 20 heures après l'événement, de sorte que nous n'en serions avertis qu'à peu près à la nouvelle Lune suivante. Le calcul suppose que la température de l'espace serait de 0°. Il faudrait moins de temps, environ 8 jours 5 heures, à un boulet de canon pour franchir la même distance, en supposant qu'il conservât une vitesse constante de 500 mètres à la seconde. La lumière enfin, le plus rapide de tous les mouvements connus, bondit de la Lune à la Terre en une seconde 1/4.

1. Le diamètre apparent a été aussi calculé dans l'hypothèse où il est vu du centre de la Terre. Vu du point de la surface terrestre qui a la Lune au zénith, il serait plus grand, et cette augmentation d'ailleurs variable peut monter jusqu'à 19″.

Il ne s'agit ici que de mobiles à vitesses constantes. Mais on pourrait aussi calculer le temps que mettrait un corps à tomber du centre de la Lune au centre de la Terre, ou, ce qui revient au même, le temps que mettrait la Lune à se réunir à notre planète, si la force tangentielle qui, combinée avec la pesanteur, lui fait décrire son orbite, venait à être subitement anéantie. Au bout de 4 jours, 19 heures, 53 minutes et 30 secondes, la catastrophe hypothétique, dont nous n'avons pas besoin de décrire les épouvantables conséquences, serait consommée.

En supposant toujours la Terre immobile dans l'espace,

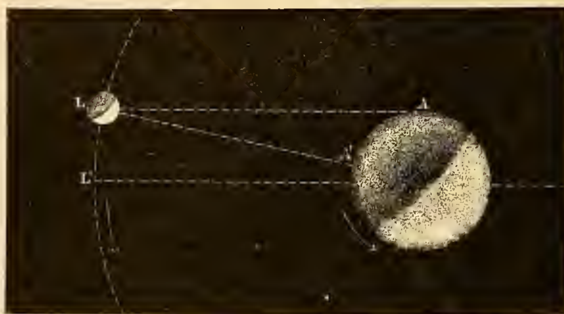


Fig. 118. Distance de la Lune à un point de la surface de la Terre, plus petite au méridien ou au zénith qu'à l'horizon.

l'orbite elliptique lunaire offre un développement de plus de 2 400 000 kilomètres, et, comme la Lune parcourt ce chemin en 27 jours 1/3, sa vitesse moyenne est d'environ 1022 mètres par seconde. Mais cette vitesse est variable ; elle s'accroît quand la Lune s'approche de la Terre et diminue si la distance des deux astres augmente (1080^{m} au périgée, 970^{m} à l'apogée).

A un instant donné, c'est toujours le point de notre globe ayant la Lune à son zénith, qui est le plus rapproché de la surface de notre satellite, et qui le voit sous les plus grandes dimensions apparentes. Par le seul fait de la rotation de la Terre, notre distance à la Lune change donc ; elle est la plus

grande au moment de sa culmination ou passage au méridien, la plus petite quand l'astre est à l'horizon. C'est ce que fait voir clairement la figure 118, où AL est évidemment plus grand que A'L. La différence maximum de ces deux distances n'est pas beaucoup moindre que le rayon même de la Terre (du moins pour un lieu où la Lune passe au zénith), c'est-à-dire égale environ au 60e de la distance totale.

Ainsi c'est au méridien que le disque lunaire nous apparaît avec ses plus grandes dimensions. Comment donc se fait-il que tout le monde éprouve l'illusion opposée, et que la Lune, à son lever ou à son coucher, paraisse beaucoup plus grosse qu'à

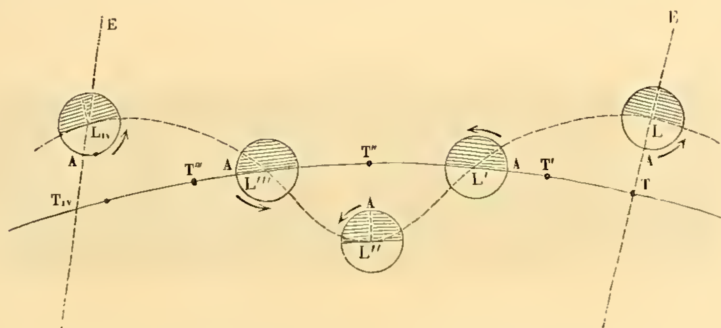


Fig. 119. Rotation de la Lune, accomplie dans l'intervalle précis d'une révolution sidérale.

une plus grande hauteur ? Il serait trop long d'exposer ici les raisons diverses à l'aide desquelles on a cru expliquer le phénomène, d'ailleurs commun au disque solaire et à celui de la Lune, et en définitive à toutes les distances célestes apparentes. Le fait est que c'est une illusion, qui disparaît, dès qu'on soumet le diamètre lunaire à des mesures rigoureuses : on voit bien alors qu'il est plus grand au méridien qu'à l'horizon.

Le disque de la Lune est parsemé de parties moins brillantes que le reste de la surface, de taches qui lui donnent un aspect particulier, une physionomie que tout le monde connaît. Or, cet aspect reste le même dans tout le cours d'une révolu-

tion ou des révolutions successives de la Lune. Les plus anciennes descriptions et les plus anciens dessins en font foi.

Voyons comment on doit interpréter ce fait.

Considérons une entière révolution sidérale de la Lune. Le rayon vecteur TL joignant les centres de la Lune et de la Terre, partant d'une position qu'on peut considérer comme fixe dans l'espace, puisqu'elle aboutit, sur la voûte céleste, à une étoile E dont la distance est infinie, décrit une circonférence entière et revient alors coïncider, en $T_{IV}L_{IV}$ avec cette direction primitive. Or, pour un observateur posté sur la Terre, ce rayon vecteur marque le point central A du disque de la Lune; et comme ce point n'a pas semblé varier de po-

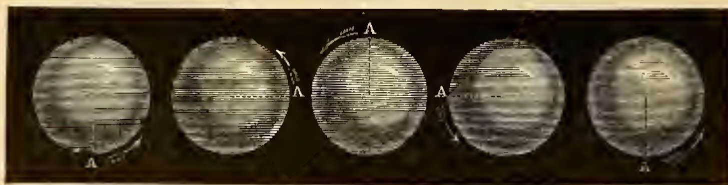


Fig. 120. Apparences successives que présenterait le globe de la Lune à un observateur situé à une distance infinie en face du plan de l'Équateur lunaire.

sition sur le disque, c'est que le rayon LA de la Lune qui y aboutit, a tourné précisément de la même manière et de la même quantité que le rayon vecteur TL, dont il est le prolongement. Dans le même temps que la Lune a effectué sa révolution sidérale, un point de sa surface a donc fait une rotation entière. En un mot, la Lune se serait montrée successivement sous toutes ses faces à un observateur placé en dehors de l'orbite à une distance infinie; les cinq positions du globe lunaire marquées de droite à gauche sur la figure 119, et correspondant aux positions $T\,T'\,T''\,T'''\,T^{IV}$ de la Terre, sont identiquement les mêmes que celles d'une sphère supposée immobile, et douée d'un mouvement de rotation de même période, ainsi qu'on peut s'en assurer en comparant les figu-

res 119 et 120, et en suivant de gauche à droite les sphères dessinées sur cette dernière figure.

La Lune a donc un mouvement de rotation autour d'un de ses diamètres ; le sens est le même que celui de son mouvement de révolution : il s'effectue comme ceux de la Terre, du Soleil et des autres astres du système planétaire, d'Occident en Orient. Quant à sa durée, elle est précisément et rigoureusement égale[1] à la période de la révolution de la Lune, c'est-à-dire à 27 jours, 7 heures, 43 minutes et 11.5 secondes. Cette égalité est le caractère distinctif, original de la rotation du globe lunaire.

L'axe de rotation de la Lune conserve dans l'espace une direction à peu près invariable. Il s'en faut de peu qu'il soit perpendiculaire à l'écliptique ; l'angle d'inclinaison est égal en effet à 88° 31′ 15″ ; l'équateur de la Lune est donc lui-même incliné de 1° 28′ 45″ sur ce dernier plan, et par conséquent de 3° 40′ sur le plan de l'orbite lunaire[2].

1. S'il y avait, entre les deux périodes, une différence constante si petite soit-elle, comme elle se multiplierait avec le nombre des révolutions de la Lune, il est clair que peu à peu l'apparence du disque changerait, et que nous finirions par voir la surface entière de notre satellite.

2. Nous avons dit que le disque lunaire présente toujours la même face à la Terre, que dès lors nous voyons toujours le même hémisphère. Mais cela n'est pas vrai rigoureusement. En réalité les taches visibles sur le disque paraissent affectées de divers mouvements, de balancements du nord au sud, de l'est à l'ouest, qui ont reçu le nom commun de librations, bien que la cause n'en soit pas la même. Il y a la libration en latitude, la libration en longitude et la libration diurne. La *libration en latitude* dépend de la plus ou moins grande élévation de la Lune au-dessus du plan de l'écliptique. Si l'axe de rotation lunaire était perpendiculaire à l'orbite, il n'en résulterait aucune différence dans la visibilité des pôles qui seraient tous deux aux extrémités d'un même diamètre du disque. Mais l'inclinaison de cet axe fait que tantôt le pôle boréal, tantôt le pôle austral de la Lune est invisible pour nous. Par compensation, nous voyons des points situés au delà de l'autre pôle, et nous découvrons ainsi plus d'un hémisphère lunaire. La *libration en longitude* résulte de l'uniformité du mouvement de rotation combinée avec la vitesse variable du mouvement de révolution : cette inégalité de vitesse angulaire des deux mouvements est cause qu'un observateur voit, de la Terre, tantôt des portions plus orientales, tantôt des portions plus occidentales du disque. En-

§ 4. GÉOGRAPHIE ET TOPOGRAPHIE DE LA LUNE.

Les nombres que nous venons de donner ne nous renseignent que sur l'importance géométrique du globe lunaire, mais ne nous disent rien sur la matière dont il est composé. Le télescope lui-même va nous faire voir quelle forme cette matière a prise sous l'influence des forces internes, et comment elle s'est agglomérée, ici en vastes plaines, là en une multitude d'aspérités, de collines, de montagnes circulaires, de pics et d'aiguilles pyramidales ayant plus ou moins d'analogie avec nos montagnes terrestres. Mais quelle est la nature des roches dont ces aspérités sont formées, celle du sol uni des vallées et des plaines? Ce sont là des questions dont la solution serait aussi intéressante qu'elle est difficile en réalité.

Toutefois, la mécanique céleste fournit à cet égard quelques données; elle nous renseigne, par exemple, sur la masse et la densité de la Lune et sur l'intensité de la pesanteur à sa surface. La masse de notre satellite a été trouvée égale à la 81e partie (0.01227) de la masse de la Terre, ou à la 26 500 000e partie de celle du Soleil : la densité de la matière dont il est composé est donc égale aux 602 millièmes de la densité

fin, il y a aussi ce qu'on nomme la *libration diurne*, qui dépend de la position des observateurs à la surface du globe terrestre. Deux observateurs postés en deux points éloignés ne voient pas le même point de la Lune au centre du disque, et une variation semblable a lieu pour un même observateur, selon la hauteur de la Lune au-dessus de son horizon.

En résumé, ces diverses oscillations sont toutes apparentes, étant dues uniquement aux changements de positions du disque relativement à un observateur terrestre; mais elles ont pour effet d'augmenter la portion de la surface lunaire visible de la Terre. D'après les calculs des astronomes Beer et Mædler, sur 1000 parties dont se compose la surface totale des deux hémisphères, 424 seulement sont toujours invisibles : 424 parties sont, pour la même raison, toujours en vue de notre planète. Au lieu donc de ne voir que 19 millions de kilomètres carrés, formant la moitié de la surface totale de la Lune, nous en apercevons successivement 22 millions.



LA PLEINE LUNE

moyenne de notre globe. Traduisons ces évaluations en nombres exprimant des quantités usuelles :

Le poids de la Lune vaut environ 72 000 000 000 000 000 000 de tonnes de mille kilogrammes. Sa densité moyenne étant 0.602, quand on la compare à la densité moyenne de la Terre, est 3.27 quand on la rapporte à celle de l'eau ; ainsi le globe lunaire pèse plus de trois fois et un quart autant qu'un globe d'eau de même dimension. Cette densité, comparée à celle de quelques minéraux de la croûte terrestre, peut donner une idée de la composition de la matière lunaire. On trouve ainsi que certains basaltes, le fer et le manganèse phosphatés, ont à peu de chose près le même poids spécifique que cette matière. La substance complexe dont sont formés quelques aérolithes est encore plus propre peut-être à nous fournir un terme de comparaison ; aussi est-il curieux de trouver les nombres 3.11, 3.54 pour les densités de quelques-uns de ces corps qui ont été recueillis après leurs chutes à la surface de la Terre.

Enfin, il est encore un élément qu'il faut faire entrer en ligne de compte, quand on veut comparer la constitution physique de la Lune à celle de notre globe terrestre : c'est l'intensité de la pesanteur à sa surface. Sur la Lune, cette intensité est 0.164, c'est-à-dire comprise entre 1/5 et 1/6 de celle qui presse les corps sur le sol terrestre. Si donc on imaginait un homme transporté dans notre satellite, si l'on supposait en outre que ses forces musculaires restassent les mêmes dans ce nouveau séjour, il y pourrait soulever sans plus d'effort des poids cinq à six fois aussi lourds que sur la Terre, et son propre corps lui semblerait cinq à six fois plus léger. On peut tirer de ce fait fondamental d'importantes conséquences, pour l'évaluation des forces qui ont été capables de soulever à de prodigieuses hauteurs les masses de roches formant les montagnes lunaires.

Les données que nous venons de mentionner, jointes aux

éléments de l'orbite, aux dimensions du globe lunaire, étaient nécessaires pour aborder l'étude de la constitution physique de notre satellite. De tous les corps célestes, c'est évidemment celui qui est le mieux connu sous ce dernier rapport; de la sorte, son rôle secondaire et sa faible importance dans l'ensemble du monde solaire sont rachetés par la multitude des renseignements précis que la proximité de la Lune a permis aux astronomes de rassembler sur sa constitution physique. D'autre part, la Lune est comme un appendice de la Terre; elle exerce sur notre globe, sur ses mouvements dans l'espace, et même sur les mouvements de ses fluides, une influence considérable. On comprendra donc les raisons des développements et des détails circonstanciés où nous croyons devoir entrer dans notre description de la Lune.

Le monde que nous allons explorer, au sein duquel nous pénétrerons pour ainsi dire, grâce à sa faible distance et à la puissance des instruments d'optique, semblable à la Terre par quelques caractères généraux, en diffère profondément par tous les autres. Si, comme nous venons d'en faire l'hypothèse, il était donné à un habitant de la Terre d'être transporté subitement à la surface de la Lune, il serait frappé du plus étrange spectacle : la configuration du sol, tout recouvert d'aspérités, de cavités circulaires, de pics élevés, l'aspect du ciel, où les étoiles brillent en plein jour, l'âpreté des lumières et des ombres, l'éternel silence qui règne dans ces régions désolées, la rigueur des températures, tantôt glacées, tantôt torrides, les singulières conditions de l'existence des êtres organisés, si toutefois la vie y est possible, tout se réunirait pour confondre en lui les notions qui lui sont le plus familières.

Cependant, quels que soient les contrastes qui séparent le monde lunaire du monde terrestre, on verra que cette variété qui se manifeste avec une richesse merveilleuse, ici comme dans toutes les œuvres de la nature, est l'effet d'un petit nombre de causes, ou plutôt le résultat de simples modifications

d'éléments qui sont au fond les mêmes pour tous les corps célestes. La simplicité des lois qui régissent les phénomènes astronomiques et physiques fait ainsi resplendir l'unité de structure du monde solaire d'un éclat incomparable.

La vue de la pleine Lune, à l'œil nu, par un ciel très-pur, permet déjà de distinguer les principales taches sombres ou brillantes, dont la permanence, nous l'avons dit plus haut, prouve que c'est toujours la même face ou le même hémisphère qu'elle tourne vers nous. De l'est à l'ouest, en remontant vers le nord, se succèdent plusieurs larges espaces grisâtres dont l'aspect uniforme contraste avec la moitié méridionale du disque, presque tout entière constellée d'une multitude de points brillants. Les bords nord-est et nord-ouest terminent le disque par des teintes plates, blanches et très-lumineuses, tandis que les régions centrales participent au ton général de la partie australe.

On avait donné jadis le nom de *mers* aux grandes taches sombres qui parsèment la moitié septentrionale de la Lune, et qui envahissent une partie de la moitié australe à l'occident et à l'orient. Cette dénomination a persisté jusqu'à nous; mais il ne faut point y attacher la signification précise que rappelle le mot. Les mers lunaires sont maintenant regardées comme des plaines, tandis que les parties les plus brillantes sont principalement des régions montagneuses. Je vais décrire sommairement les unes et les autres, en priant le lecteur de suivre ma description sur la planche XV, qui représente la pleine Lune. L'image est renversée et telle qu'on la voit dans une lunette astronomique, le pôle austral en haut, le pôle boréal en bas, le côté ouest à gauche et le côté est à droite[1].

1. Il ne faut pas oublier que ce que nous appelons ici *côté ouest* et *côté est* correspond, sur la Lune même, à l'Orient et à l'Occident. Cette remarque, déjà faite pour le Soleil, est générale; elle s'applique à tous les corps célestes que nous observons, et dont le mouvement de rotation a le même sens que celui de la Terre.

Je commence par les mers.

Tout près du bord occidental à gauche de la carte, on voit une tache grise, de forme ovale, isolée au milieu de la teinte lumineuse du bord : c'est la *Mer des Crises*. Entre cette tache et le centre du disque, un large espace sombre, découpé sur son bord austral par une sorte de promontoire aigu, a reçu le nom de *Mer de la Tranquillité*. Cette mer projette vers l'ouest et le sud deux appendices, dont l'occidental et le plus grand forme la *Mer de la Fécondité*, tandis que l'autre, plus petit et plus rapproché du centre, est la *Mer de Nectar*. Si maintenant de la Mer de la Tranquillité on remonte vers le nord (on descend, sur la carte), on trouve la *Mer de la Sérénité*, traversée dans toute sa longueur par une raie plus brillante, à peu près rectiligne, et qui donne vaguement à la tache entière la forme de la lettre grecque majuscule Φ. La *Mer des Vapeurs* est comme un prolongement, vers le centre, de celle de la Sérénité. Enfin la *Mer des Pluies*, de forme ronde, la plus vaste de toutes celles qu'on vient de passer en revue, termine au nord la série des taches grisâtres auxquelles on est convenu de conserver le nom impropre de mers. Il faut ensuite redescendre vers l'est pour trouver l'*Océan des Tempêtes*, dont les contours plus vagues vont se perdre, vers le sud, dans la *Mer des Humeurs* et dans la *Mer des Nuées*, à peu de distance d'un point lumineux d'où partent, dans toutes les directions, des sillons blanchâtres d'une grande longueur.

Ce dernier point, qu'on peut considérer comme le centre des régions montagneuses qui environnent le pôle austral, n'est autre chose que Tycho, une des plus importantes élévations, en forme de cirque, de l'hémisphère visible de la Lune.

On distingue encore, au-dessous de la mer de la Sérénité et dans le voisinage du pôle boréal, une tache étroite allongée de l'est à l'ouest, et connue sous le nom de *Mer du Froid;* sur la limite du bord nord-ouest, une tache d'une forme ovale

fort allongée : c'est la *Mer de Humboldt;* et enfin, sur le bord extrême du sud-ouest, la *Mer Australe*, dont on n'aperçoit sans doute qu'une partie. Toutes ces prétendues mers projettent, sur leurs rives ou dans leur prolongement, des taches sombres plus petites qui ont reçu le nom de golfes, de lacs ou de marais. Citons-en quelques-uns.

Entre les mers de la Sérénité et du Froid, s'étendent le *Lac des Songes* et le *Lac de la Mort*. Les *Marais de la Putréfaction* et *des Brouillards* occupent la partie occidentale de la mer des Pluies, dont la rive septentrionale forme un golfe arrondi connu sous le nom de *Golfe des Iris* ou *des Arcs-en-ciel*. Le *Golfe de la Rosée* est le prolongement vers l'extrême nord-ouest de l'Océan des Tempêtes. Enfin citons encore : le *Marais du Sommeil*, à l'ouest de la Mer de la Tranquillité; le *Golfe du Centre*, qui est le prolongement méridional de la Mer des Vapeurs; puis le *Golfe des Marais*, qui s'avance jusque sur le bord méridional de la Mer des Pluies.

Quant aux grands espaces lumineux et brillants qui encadrent les taches grisâtres que nous venons de décrire, ils n'ont pas reçu — nous ignorons pourquoi — de dénominations particulières.

Les taches lunaires que nous venons de décrire, examinées à l'œil nu, ne nous apprendraient rien encore sur la structure réelle du sol de notre satellite. C'est au télescope qu'il faut les étudier, ainsi que les régions brillantes qui les entourent et dont nous n'avons rien dit encore, sinon qu'elles diffèrent d'éclat avec les premières. Mettons donc l'œil à un instrument d'une moyenne puissance, à une lunette permettant un grossissement de 40 à 60 diamètres. Choisissons l'époque où la Lune est à l'un ou à l'autre de ses quartiers, c'est-à-dire quand le disque nous présente éclairée sa moitié occidentale ou sa moitié orientale.

Un spectacle merveilleux s'offre aussitôt à notre vue (planche XVI). Toutes les parties blanches ou brillantes du disque

nous apparaissent parsemées d'une multitude prodigieuse de cavités de forme circulaire ou ovale et de dimensions très-diverses. C'est dans les régions centrales, ou mieux sur les limites de la partie éclairée de la Lune, que ces accidents de

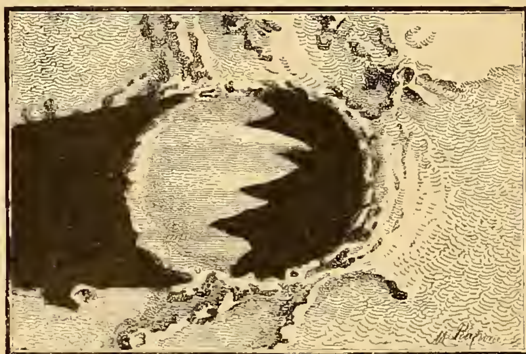


Fig. 121. Cratère lunaire après le lever du Soleil sur l'horizon de la Lune.

la surface semblent le mieux accuser la structure dont nous parlons et qu'il est impossible de méconnaître. Ce sont comme autant de coupes dont les bords ou arêtes, en forme de rem-

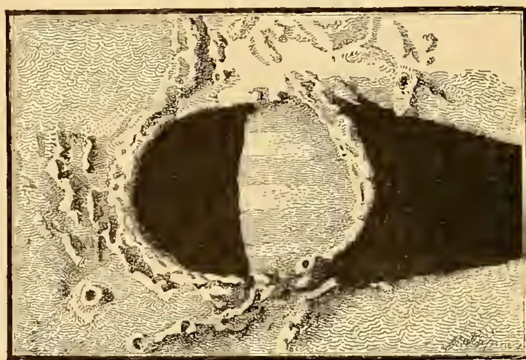


Fig. 122. Cratère lunaire avant le coucher du Soleil sur la Lune.

parts, s'élèvent à la fois au-dessus du niveau général et au-dessus du fond même de la cavité. Chacune d'elles est vivement éclairée du côté même de la lumière, c'est-à-dire à l'extérieur pour le demi-cercle qui présente sa convexité aux



LE PREMIER QUARTIER

rayons solaires, et à l'intérieur pour l'autre moitié de l'enceinte qui leur présente sa concavité. Au contraire, du côté de la moitié obscure du disque, on aperçoit des ombres très-accusées qui achèvent de dessiner à merveille la forme générale de tous ces accidents du sol. Le fond même de la coupe est tantôt très-lumineux, tantôt d'une teinte plus sombre, et, dans quelques-unes des cavités, on aperçoit très-nettement des éminences qui portent ombre sur le sol intérieur. Leurs dimensions, avons-nous dit, sont très-variées. Les unes paraissent comme de petits trous dont le sol est criblé. Les autres sont comme de vastes cirques ou enceintes circulaires, renfermant quelquefois, à leur intérieur et sur leurs bords, des cavités d'une dimension beaucoup moindre.

Ce premier coup d'œil jeté, à l'aide d'une lunette, sur le disque de la Lune, nous démontre avec une pleine évidence que le sol lunaire est couvert d'aspérités et de dépressions. Ces aspérités ne sont autre chose que les montagnes de la Lune.

Continuons notre exploration.

Nous avons vu que la forme des accidents du sol est tantôt circulaire, tantôt ovale. Y a-t-il une réelle différence entre ces deux aspects? Non, comme nous pourrons aisément nous en convaincre. Remarquons cette circonstance. La forme exactement circulaire appartient à toutes les cavités, à toutes les enceintes situées dans les régions centrales du disque. Quand on examine celles qui s'éloignent du centre pour se rapprocher peu à peu des bords, on voit que leur forme devient insensiblement ovale ou elliptique, et l'ovale est d'autant plus allongé que la cavité qu'on examine est plus rapprochée du bord, quelle que soit d'ailleurs la direction qu'on ait choisie pour faire cet examen. En outre, le plus grand diamètre de chaque ellipse est toujours parallèle à la portion d'arc de cercle du bord lunaire, que va rencontrer le rayon qui joint le centre du disque au centre de la cavité considérée. La plus simple réflexion sur ces circonstances singulières nous oblige à re-

connaître que la forme réelle de chaque cavité, de chaque enceinte, est la forme circulaire. L'apparence elliptique n'est due qu'à un effet de perspective, provenant de ce que chaque cercle se trouve tracé sur les diverses parties d'une moitié de sphère. Les portions de surface qui se trouvent en face de notre rayon visuel perpendiculairement à sa direction nous apparaissent non déformées; les autres, au contraire, sont vues obliquement, et leur déformation est d'autant plus con-



Fig. 123. Un fragment de la chaîne des Apennins, d'après J. Nasmyth.
(Échelle de 10mm pour 37 kil. ou de $\frac{1}{3\,700\,000}$).

sidérable qu'elles appartiennent à des régions vues sous une obliquité plus grande.

Supposons maintenant que nous ayons observé la Lune à l'époque précise du premier quartier. Le lendemain et les jours suivants, si le ciel le permet, continuons notre examen.

Nous verrons la lumière envahir successivement les régions orientales du disque, et de nouvelles aspérités peu à peu apparaître, dont les sommets seuls étaient d'abord éclairés par le Soleil (suivre toujours la planche XVI). Rien n'est plus curieux

que de voir se dessiner, d'abord au sein de l'ombre, la paroi intérieure d'une cavité nouvelle sous forme de croissant, puis peu à peu la lumière grandir, pénétrer au fond de la coupe et en éclairer tout le contour. D'autres fois, c'est un point lumineux isolé dont le sommet brille, tandis que la base de l'éminence est tout entière encore plongée dans la nuit. On assiste de la sorte, en réalité, au lever du Soleil sur la Lune. Au dernier quartier, les ombres ont une direction opposée; mais les mêmes phénomènes se présentent en sens contraire, et les mêmes régions étant vues alors au coucher du Soleil, ce sont les versants orientaux des montagnes qui reçoivent sa lumière.

A mesure que la Lune suit ainsi son cours et que sa phase éclairée s'agrandit, on voit, comme on devait s'y attendre, les ombres des montagnes diminuer d'étendue, le fond des plaines s'éclairer d'une lumière plus vive, et la structure de notre satellite se déployer devant nos yeux dans tous ses détails.

On a donné, aux cavités lunaires de petites et de moyennes dimensions, le nom de *cratères* ou de *volcans;* à celles qui affectent des dimensions plus considérables, celui de *cirques*, et les montagnes isolées, de forme pyramidale ou conique, qui s'élèvent le plus souvent à l'intérieur des cirques, sont des *pics* ou *pitons*. Les plus importantes des montagnes lunaires ont reçu des dénominations particulières empruntées aux noms des savants les plus illustres de l'antiquité et des temps modernes. Quant aux appellations générales dont il vient d'être question, elles sont justifiées par le caractère éminemment volcanique que tous les astronomes reconnaissent aux montagnes lunaires.

Les chaînes de montagnes sont relativement peu nombreuses à la surface de l'hémisphère visible de la Lune. La plupart se trouvent dans la partie septentrionale du disque. Les Alpes, le Caucase, les Apennins sont les plus remarquables. Cette dernière chaîne sépare la Mer des Vapeurs de la Mer des Pluies, qu'elle borde au sud-ouest d'une enceinte

en forme d'arc de cercle. Les monts Hemus et Taurus bordent au sud et à l'ouest la Mer de la Sérénité. Citons encore : les Karpathes et les monts Ourals, qui séparent l'Océan des Tempêtes de la Mer des Pluies et de celle des Nuées; les monts Dœrfel et Leibnitz, au pôle austral; les Pyrénées, qui séparent les plaines de la Fécondité et du Nectar; les monts Altaï, voisins de cette dernière mer, présentant un développe-

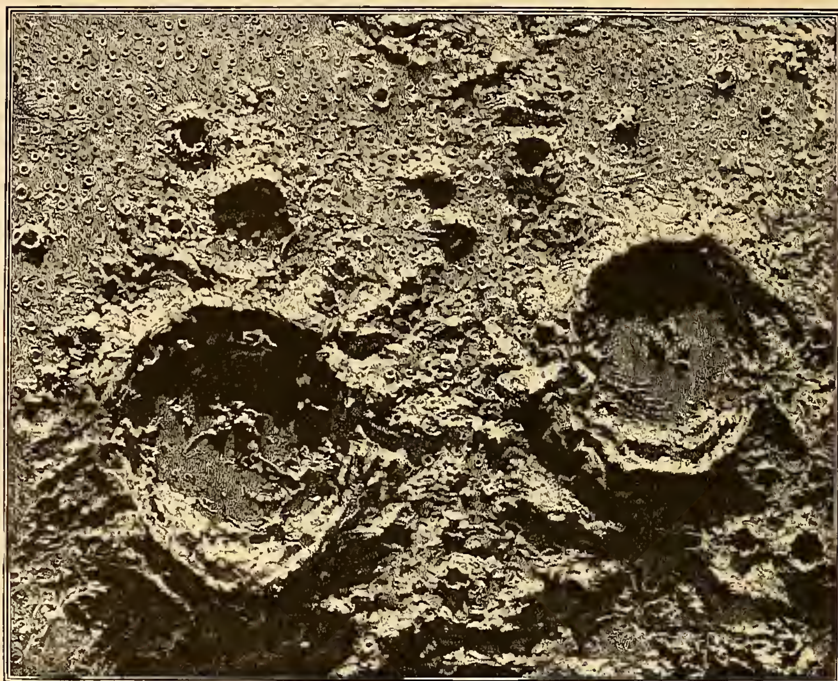


Fig. 124. Cratères lunaires : les cirques d'Eudoxus et d'Aristote, (Échelle de 1^{mm} pour 2 kil. ou de $\frac{}{2\,000\,000}$).

ment de 100 lieues sous la forme d'un arc de cercle dont la concavité est orientée vers le nord-ouest; et enfin, les Cordillères et les monts d'Alembert, sur le bord oriental de la Lune. Les Apennins, les plus considérables de ces chaînes de montagnes, n'offrent cependant qu'un développement de 150 lieues de longueur. Il y a, d'ailleurs, une différence caractéristique entre les chaînes lunaires et les chaînes ter-

restres. Tandis que celles-ci s'étendent le plus souvent en ligne droite, ou parallèlement à un grand cercle de la sphère, formant une série de systèmes qui se coupent sous divers angles et dont chacun correspond à une époque particulière de soulèvement, les chaînes de montagnes de la Lune sont presque



Fig. 125. Le cirque de Copernic, d'après l'amiral Smyth.

toutes développées en arcs de cercle, comme si elles avaient appartenu jadis à d'immenses cirques ou circonvallations. Elles ont, sous le rapport de la forme, quelque analogie avec le cirque de la Bohême [1].

1. Il n'est pas douteux que la plupart des chaînes de montagnes lunaires ne sont autre chose que les remparts d'immenses cirques qui ont été plus ou moins ébréchés et déformés par des formations sélénologiques plus récentes. Cette origine est évidente, quand on examine la Mer des Pluies, par exemple : la forme circulaire de cette plaine immense est parfaitement accusée, au

Un mot maintenant de la hauteur des montagnes de la Lune.

Les plus élevées de toutes sont dans le voisinage du pôle austral : c'est là qu'on trouve le mont Dœrfel, dont le sommet atteint 7600 mètres d'altitude, les monts Casatus et Curtius, de 6956 et 6769 mètres, et la montagne annulaire de Newton, de 7264 mètres de profondeur. « L'excavation de cette dernière est telle, dit Humboldt, que jamais le fond n'en est éclairé ni par la Terre, ni par le Soleil, » circonstance qui tient aussi à sa position extrême près du pôle sud de la Lune. Dans les régions boréales, on trouve aussi des hauteurs considérables : Calippus, dans le Caucase, Huyghens, dans les Apennins, atteignent respectivement 6216 et 5550 mètres de hauteur. La crête de cette dernière chaîne est bordée, sur un de ses côtés, de précipices d'une effrayante profondeur, et au lever du Soleil, les pics dont elle est formée vont projeter leurs ombres à une distance de plus de 130 kilomètres (fig. 123). Les montagnes en forme de dômes ou de pyramides, isolées au centre des cirques ou des cratères, sont généralement moins élevées que les sommets de leurs enceintes. Mais, si l'on mesure leurs hauteurs à partir du niveau du sol inférieur, on trouve encore des sommités qui dépassent les plus hautes montagnes de notre Europe : le piton du cratère de Tycho a 5000 mètres de hauteur, et celui d'Ératosthène, à l'extrémité de la chaîne des Apennins, s'élève de 4800 mètres au-dessus du fond du cirque.

En résumé, d'après les nombreuses mesures dues à Beer et Mædler, 39 montagnes lunaires sont supérieures à la cime de

nord-ouest, par les Alpes; à l'ouest, par les monts Caucase; au sud-ouest et au sud, par les Apennins et les Karpathes. Une suite de golfes limités par des collines bornent cette plaine au nord et au nord-est. Une brèche située entre les Apennins et le Caucase fait communiquer la Mer des Pluies avec celle de la Sérénité; une autre brèche donne accès à la Mer du Froid. Du côté du sud-est, toute barrière a disparu, et l'accès est libre vers l'Océan des Tempêtes.

notre Mont-Blanc, et 6 ont plus de 6000 mètres, rivalisant ainsi avec les plus hautes cimes des Cordillères des Andes, de notre continent américain. Les dimensions en diamètre des aspérités lunaires ne sont pas moins étonnantes que leurs hauteurs verticales. Citons les immenses cirques de Ptolémée, de Copernic et de Tycho, dont les diamètres intérieurs mesurent respectivement 180, 96 et 88 kilomètres, et plus de 30 autres cirques de plus de 80 kilomètres de dimensions transversales. Le cirque de Shickardt est un des plus considérables de l'hémisphère visible de la Lune : son diamètre ne mesure pas moins de 256 kilomètres ou 64 lieues; et la hauteur de l'une des montagnes qui le bordent est 3200 mètres. Circonstance singulière! un observateur placé au centre de l'immense plaine circulaire qui forme Shickardt ne pourrait apercevoir le sommet des hautes montagnes qui l'environnent de tous côtés. Leur distance et la courbure du sol sont telles, que les bords du cratère plongent sous l'horizon visible. Quelle différence avec les cratères de nos volcans, « qui, à la distance de la Lune, seraient à peine visibles au télescope! » (Humboldt.) Du reste, parmi les cratères proprement dits, il n'est pas rare d'en trouver qui offrent des diamètres de 4 à 5 lieues.

Ajoutons qu'en plusieurs points les parties montagneuses du sol lunaire sont criblées d'une multitude prodigieuse de cratères relativement fort petits, c'est-à-dire ayant un diamètre compris entre 1 et 2 kilomètres. Les environs des cirques Eudoxus et Aristote (fig. 124) sont un exemple de cette structure singulière du sol de notre satellite.

§ 5. GÉOLOGIE LUNAIRE.

Les montagnes de la Lune sont d'origine volcanique.

C'est là un fait capital qui ressort directement de la forme arrondie, annulaire des grandes vallées, des cirques et de

toutes les cavités plus petites auxquelles on a donné, nous l'avons vu, le nom de cratères[1].

Mais, si l'origine ignée paraît la seule vraisemblable pour toutes les aspérités montagneuses et cratériformes, ce n'est pas à dire qu'elles soient uniquement le produit d'éruptions volcaniques dans le sens restreint du mot. La Lune a été primitivement, comme la Terre, un globe fluide, à la surface duquel le refroidissement, dû au rayonnement calorifique, a déterminé la formation d'une écorce solide. C'est cette écorce qui a été le siége des phénomènes subséquents dont les traces subsistent aujourd'hui sous la forme d'aspérités de dimensions très-différentes ; et les causes de cette série de productions sont, sans aucun doute, les forces expansives des gaz et des vapeurs que la haute température du noyau développait incessamment. A l'origine, l'écorce solide de la Lune, moins épaisse, était par cela même moins résistante ; et comme elle n'avait point encore été bouleversée par les secousses antérieures, elle devait présenter en tous ses points à peu près la même homogénéité et la même épaisseur. La force expansive des gaz agissant alors perpendiculairement aux couches superficielles et suivant les lignes de moindre résistance, dut briser l'enveloppe et produire des soulèvements de forme circulaire. C'est sans doute à cette période qu'il faut rapporter la formation

1. Depuis longtemps, tous les astronomes s'accordent à considérer les formations du sol lunaire comme dues à une réaction des forces internes contre l'écorce extérieure du globe. Robert Hooke « attribuait ces phénomènes à l'effet de feux souterrains, à l'irruption de vapeurs élastiques, ou même à un bouillonnement dégageant des bulles qui viennent crever à la surface. Des expériences faites avec des boues calcaires en ébullition lui parurent confirmer ses vues; et dès lors on compara les circonvallations et leurs montagnes centrales aux formes de l'Etna, du pic de Ténériffe, de l'Hécla et des volcans de Mexico. » (Humboldt.) — Sir John Herschel n'est pas moins affirmatif à cet égard : « Les montagnes lunaires, dit-il, offrent au plus haut degré le vrai caractère volcanique, tel que le présentent le cratère du Vésuve et les districts volcaniques des Champs Phlégréens ou du Puy-de-Dôme. » (*Outlines of Astronomy.*)

des immenses circonvallations dont l'intérieur est aujourd'hui occupé par les plaines appelées mers. Nous avons déjà fait ressortir la forme circulaire de la Mer des Crises et de celles de la Sérénité, des Pluies et des Humeurs. Leurs enceintes, à demi ruinées par des révolutions postérieures, forment encore aujourd'hui, comme nous l'avons dit plus haut, les plus longues suites d'aspérités du sol lunaire, les chaînes de montagnes des Karpathes, des Apennins, du Caucase et des Alpes, les monts Hémus et Taurus.

Puis vinrent de nouveaux soulèvements, mais qui, survenus à une époque où la croûte du globe lunaire avait acquis une plus grande épaisseur, ou encore provenant de forces élastiques moins considérables, donnèrent lieu aux plus grands cirques, déjà bien inférieurs en dimensions aux formations primitives. Tels paraissent être les cirques de Shickardt, de Grimaldi, de Clavius, de Petau, de Langrenus, d'Endymion.

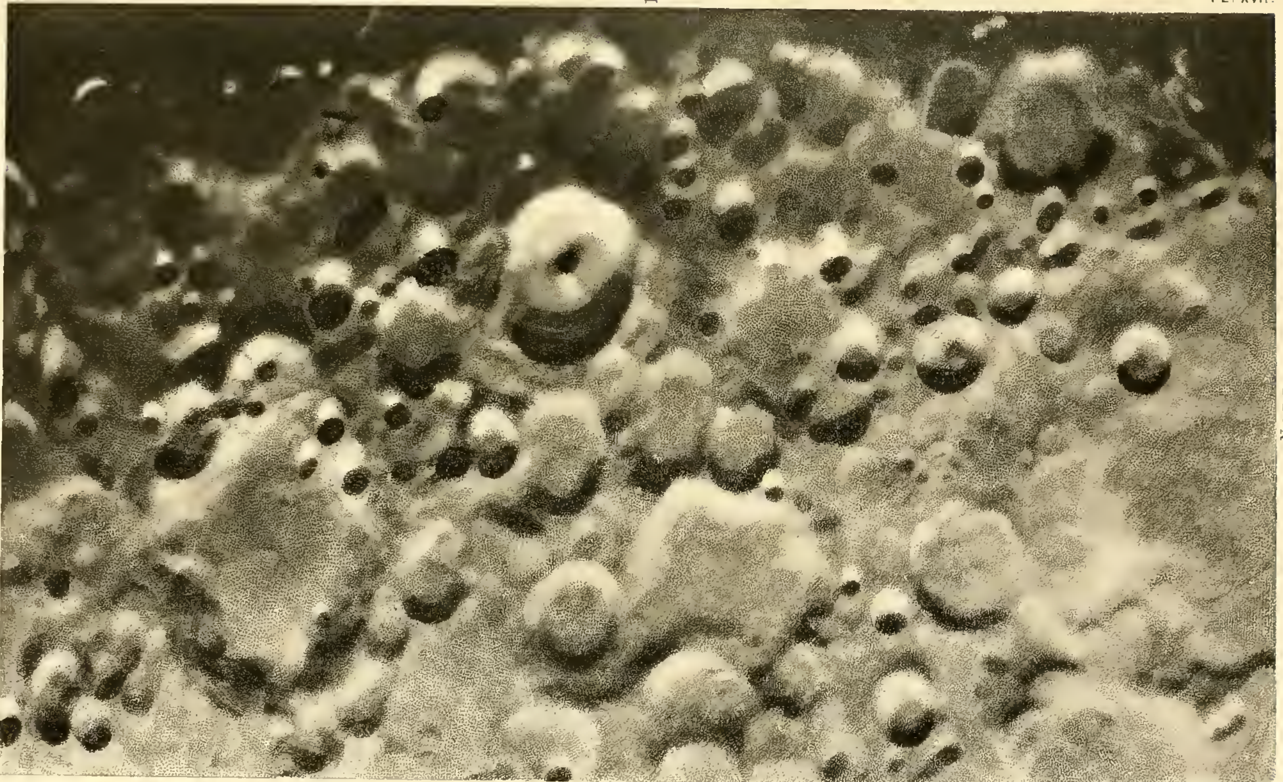
Apparurent ensuite une foule de cirques de dimensions moyennes, dont les enceintes couvrirent le sol tout entier de la Lune, et qui se formèrent au sein même des circonvallations primitives. On comprend aisément la raison de la diminution successive des dimensions des montagnes annulaires, cratères et cirques. Chaque cirque est dû, d'après notre hypothèse, à un soulèvement en bulle ou en vessie, dont l'affaissement a produit à l'intérieur une cavité de forme elliptique et sur les bords une ou plusieurs enceintes sous forme de remparts. Or, les dimensions de ces boursouflements durent être en rapport et avec l'intensité de la force interne qui les produisait, et avec la résistance de la croûte solide, ou plutôt pâteuse, du globe lunaire. Il est probable que ces deux causes ont concouru pour produire les effets signalés plus haut, de sorte qu'en général ce sont les plus grands cirques ou cratères qui furent formés les premiers. La planche XVII, que nous devons à la bienveillance de M. Warren de la Rue, et qui représente, d'après une de ses magnifiques photogra-

phies lunaires, les montagnes des environs de Tycho, permet de reconnaître aisément l'âge relatif de plusieurs formations cratériformes; et l'on y voit clairement qu'en général les plus petits cratères sont en effet les plus réguliers, que la plupart se sont formés sur les parois des cratères plus considérables, de sorte que les circonvallations de ceux-ci en sont ébréchées, et de circulaires qu'elles étaient à l'origine, ont pris une forme polygonale.

Mais c'est le moment de faire une distinction entre les deux natures de sol qui caractérisent la surface de notre satellite. Le premier constitue ce qu'on a nommé dès le début le sol continental; c'est celui des régions montagneuses qui recouvrent presque toute la partie australe de l'hémisphère visible. « Sa structure poreuse, dit un observateur bien familiarisé avec les études sélénologiques, M. Chacornac[1], son grand pouvoir réflecteur et surtout son élévation au-dessus des plaines, l'ont fait distinguer nettement du sol nivelé, dont la couleur sombre, la surface lisse lui donnent toutes les apparences des plaines d'alluvion, suivant l'expression de sir J. Herschel. » Les mers de la Lune sont-elles, en effet, des plaines d'alluvion? Non, pas précisément dans le sens terrestre de ce mot. L'astronome que nous venons de citer récuse en effet cette expression comme impropre. Mais il s'appuie sur de nombreux et très-intéressants phénomènes, pour admettre qu'à la période primitive où les plus grandes circonvallations ont apparu, a dû succéder une sorte de diluvium général ou d'épanchement boueux. « Cet épanchement aurait enseveli sous une masse brune plus des deux tiers de la surface visible de la Lune, le fond de tous les grands cratères, en s'étalant d'une extrémité à l'autre, sensiblement sur un même niveau. »

En effet, parmi les cratères innombrables dont les cavités

1. *Note sur les apparences de la surface lunaire.*



WARREN DE LA RUE, Phot.^t D.J. POUND, Sculp.^t

LES MONTAGNES DE LA LUNE.

Fac-simile d'une Photographie de Mr Warren de la Rue (96 centim. de diamètre)

criblent la surface du sol lunaire, les uns présentent, à l'intérieur, une excavation de forme régulièrement conique, ou plutôt elliptique, parfaitement évidée, et dont les bords ou remparts sont intacts. D'autres, au contraire, ont leurs enceintes ébréchées, et le fond de la cavité est plat et de niveau avec le sol des vallées environnantes. (Voyez les figures 126 et 127.) C'est surtout sur le rivage des mers que se rencontrent ces cratères en partie démolis et dont il paraît évident que la cavité a été remplie par l'épanchement que signale M. Cha-

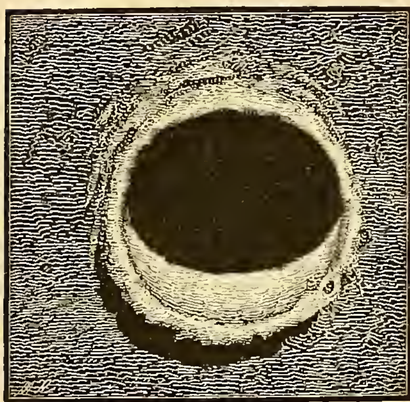


Fig. 126. Cratère lunaire en forme de coupe ou à fond elliptique.

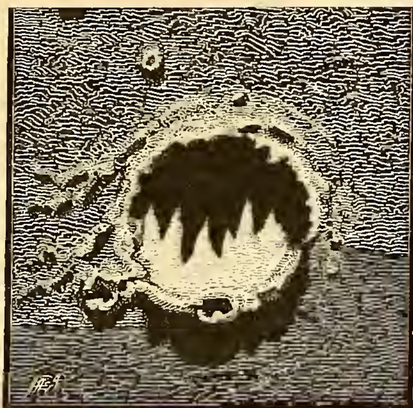


Fig. 127. Cratère lunaire à fond plat ou comblé.

cornac. « La configuration de ces rivages présente de vastes baies semi-circulaires, dont l'entrée est en partie obstruée par les débris de l'enceinte ruinée, précisément dans la direction du large (fig. 128), comme cela a lieu du reste pour le fond du cratère de l'île Saint-Paul (Océan Indien), envahi de nos jours par les eaux de l'Océan. » Le Golfe des Iris, sur le bord de la Mer des Pluies, est un des exemples les plus remarquables de cet envahissement. Mais on peut en citer beaucoup d'autres, parmi lesquels nous nommerons au hasard : Hippalus et Doppel Mayer, dans la Mer des Humeurs ; Davy et Bonpland, dans celle des Nuées ; Fracastor, sur le rivage austral

de la Mer de Nectar. Plusieurs des cratères qui se sont soulevés à l'intérieur même des plaines paraissent en partie couverts par la même irruption de matières liquides ; M. Chacornac cite les cirques Kiès et Lubiniezky (Mer des Nuées) comme des types curieux de cette formation. « Chacun d'eux présente des remparts de quarante-cinq lieues environ de développement, s'élevant à pic, au sein d'un immense désert, jusqu'à deux ou trois cents mètres de hauteur. » D'autres cirques paraissent enfouis presque entièrement, et l'on ne voit plus que de fai-



Fig. 128. Cratère ébréché enseveli, sur les rives de l'Océan des Tempêtes, d'après un dessin de J. Chacornac.

bles vestiges de leurs enceintes. Nous citerons un cirque immense, situé au nord de l'Océan des Tempêtes, et voisin du cratère Flamsteed, qui s'est élevé depuis sur les bords de l'enceinte primitive.

D'après ces vues, auxquelles les faits observés donnent un grand degré de vraisemblance, on voit que la différence d'aspect du sol des montagnes et du sol des plaines serait due à une différence d'origine. On s'explique alors « l'apparence raboteuse, rugueuse (fig. 129), accidentée d'aspérités, de boursouflures scoriformes qui donnent au sol continental l'aspect du mâchefer. » On comprend le contraste que pré-

sente, vis-à-vis de ce sol tourmenté, « l'apparence lisse des surfaces dites maritimes, semblables à du plâtre coulé, ou mieux encore à une immense plaine de boue desséchée. »

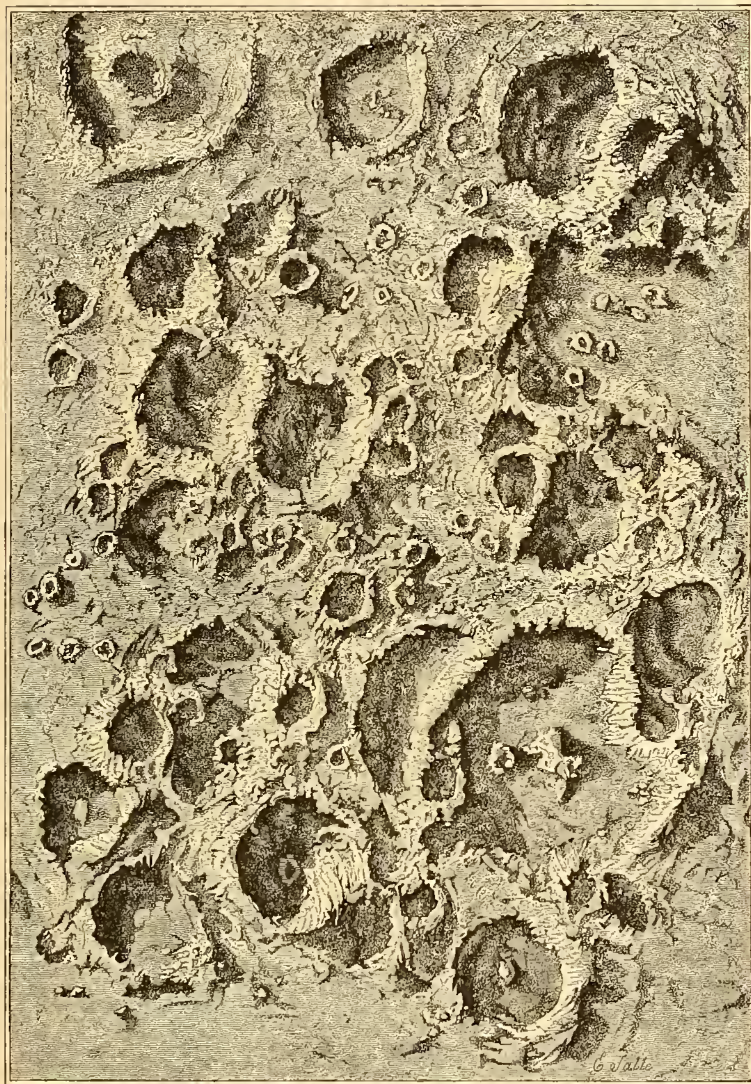


Fig. 129. Montagnes des environs sud-est de Tycho, d'après Nasmyth.

Maintenant, à quelle crise attribuer l'apparition de ce diluvium ? Il est difficile de répondre à cette question, dont la

solution exigerait que l'on connût parfaitement les états antérieurs par lesquels a passé notre satellite. Le savant observateur, à qui nous avons emprunté les rapprochements si curieux qui précèdent, attribue l'origine des épanchements boueux à la précipitation des gaz non permanents qui constituaient autrefois l'atmosphère lunaire. « On comprend en effet, dit-il, que, notre satellite étant parvenu à un certain degré de refroidissement, la pression atmosphérique favorisât la précipitation

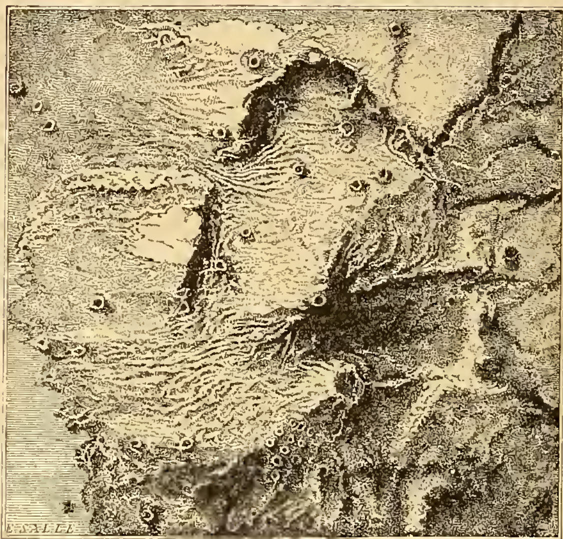


Fig. 130. Le pic de Ténériffe et ses environs, d'après Piazzy Smyth.

des gaz et des vapeurs, qui se répandirent sous forme de pluie sur tous les points de la surface, et comblèrent ainsi les grands cratères formés de toutes parts, tandis que ceux de l'époque postérieure à la consolidation de ces fluides sont complétement à l'abri de tout dépôt sédimentaire. »

Il y a, comme on le voit, entre les volcans de la Lune et les volcans terrestres, en même temps que certaines analogies, des différences faciles à saisir. Le côté commun, ou de ressemblance, consiste principalement dans l'origine ignée ou plutonienne, comme disent les géologues. Mais il est probable

que les phénomènes qui ont été, sur le globe lunaire, la conséquence des actions intérieures, ne se sont pas, en général, passés de la même façon que les phénomènes éruptifs terrestres. On peut assigner à cette différence des raisons de plusieurs ordres. D'abord, les substances composant la masse de notre satellite sont sans doute tout autres que celles qui

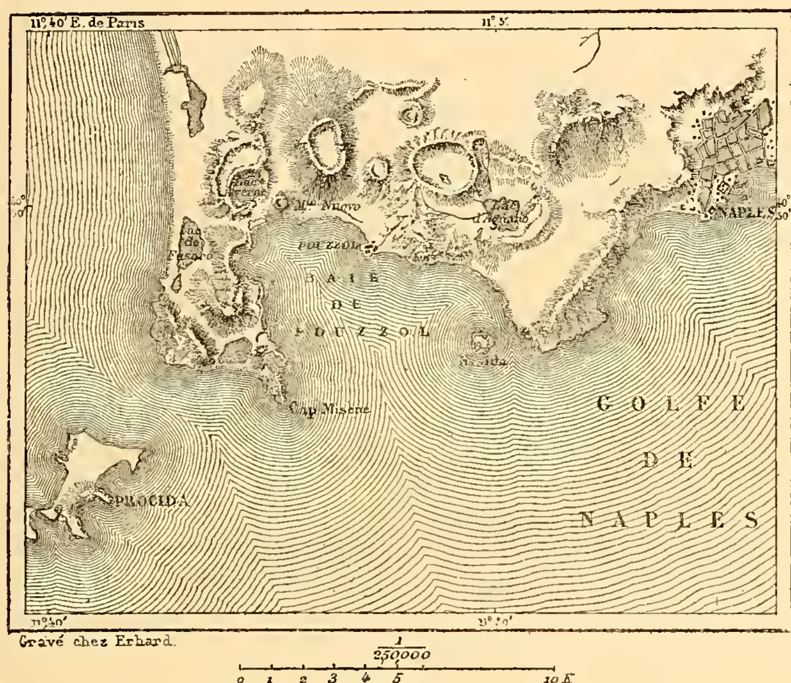


Fig. 131. Les Champs Phlégréens, dans le voisinage du Vésuve.

forment le noyau de la Terre : tout au moins, comme on le sait avec certitude, leurs densités moyennes diffèrent beaucoup. La pesanteur à la surface étant, sur la Lune, cinq à six fois moindre que la pesanteur à la surface de notre globe, on comprend combien ce seul élément est susceptible de modifier les effets dus aux actions souterraines; il faut y ajouter l'absence ou la presque nullité de la pression atmosphérique. Les cônes d'éruption des volcans terrestres s'élèvent le plus souvent à une grande hauteur au-dessus du sol des plaines

ambiantes, tandis que le cratère proprement dit offre une profondeur beaucoup moindre. Ce cratère doit être plutôt considéré comme l'orifice évasé d'une cheminée étroite qui communique profondément avec les couches internes du globe. Sur la Lune, il en est tout autrement : c'est la cavité intérieure qui est la plus profonde, et les flancs de l'enceinte sont moins élevés par rapport au niveau du sol extérieur, de sorte que la montagne paraît plutôt formée par l'affaissement d'une bulle primitive que par une éruption volcanique proprement dite. La comparaison des cratères lunaires que représentent les figures 124, 125 et 129 avec le volcan de Ténériffe et avec la région des cratères volcaniques des Champs Phlégréens (fig. 130 et 131), fera comprendre mieux qu'une description la différence de structure que nous venons de signaler.

Peut-être, parmi les cratères de petites dimensions, dont la profondeur ne permet pas de voir le niveau interne, en est-il qui sont tout à fait analogues aux cratères des volcans terrestres. On a vu que ce sont en général ceux dont l'origine paraît la plus récente.

Enfin, il est possible aussi que la différence de structure que l'on remarque entre le sol lunaire et le sol continental de notre globe, tienne à ce qu'aucune formation véritablement sédimentaire n'est venue détruire, effacer les traces des formations plutoniennes. C'est l'opinion de Humboldt : « On peut se figurer notre satellite, dit-il, à peu près tel que dut être la Terre dans son état primitif, avant d'être couverte de couches sédimentaires riches en coquilles, de graviers et de terrains de transport, dus à l'action continue des marées ou des courants. A peine peut-on admettre qu'il existe dans la Lune quelques couches légères de conglomérats et de détritus formés par le frottement. Dans nos chaînes de montagnes, soulevées au-dessus des crevasses dont le sol terrestre est sillonné, on commence à reconnaître, çà et là, des groupes partiels d'éminences qui représentent des espèces de bassins ovales.

CIRQUES ET CRATÈRES
DE LA RÉGION OCCIDENTALE.

1 Simpelius.
2 Short.
3 Moretus.
4 Mazinus.
5 Vlacq.
6 Nearchus.
7 Hommel.
8 Bacon.
9 Clairaut.
9 *bis* Licetus.
10 Maginus.
11 Furnerius.
12 Rheita.
13 Metius.
14 Fabricius.
15 Riccius
16 Maurolycus
17 Fernel.
18 Stoefler.
18 *bis* Saussure.
19 Nonius.
20 Walter.
20 *bis* Humboldt.
21 Hase.
22 Petau.
23 Snell.
24 Stevin.
25 Borda.
26 Santbech.
27 Neander.
28 Piccolomini.
29 Fracastor.
30 Polybe.
31 Catherine.
32 Sacrobosco.
33 Pontanus.
34 Geber.
35 Azophi.
36 Poisson.
37 Apian.
38 Playfair.
39 Aliacensis.
40 Werner.
42 Lacaille.
43 Purbach.
44 Airy.
45 Vindelinus.
46 Langrœnus.
47 Colomb.
48 Goclenius.
49 Guttemberg.
50 Isidore.
51 Capella.
52 Théophile.
53 Cyrille.
54 Kant.
55 Almanon.
56 Abulfeda.
57 Descartes.
58 Taylor.
59 Parrot.
60 Albategnius.
61 Hipparque.
62 Réaumur.
63 Schubert.
64 Apollonius.
65 Firmicus.
66 Messier.
68 Taruntius.
69 Maskelyne.
70 Delambre.
71 Sabine.
72 Ritter.
73 Arago.
74 Boss.
75 Godin.
76 Agrippa.
77 Silberschlag.
78 Boscovich.
79 Hyginus.
80 Triesnecker.
81 Ukert.
82 Condorcet.
83 Picart.
84 Proclus.
85 Macrobe.
86 Vitruve.
87 Maraldi.
88 Roemer.
89 Littrow.
90 Pline.
91 Ménélas.
92 Bessel.
93 Manilius.
94 Cléomèdes.
95 Geminus.
96 Messala.
97 Gauss.
98 Posidonius.
99 Linné.
100 Calippus.
101 Mason.
102 Plana.
103 Thœtète.
104 Cassini.
105 Struve.
106 Atlas.
107 Endymion.
108 Hercule.
109 Burg.
110 Baily.
111 Eudoxus.
112 Aristote.
113 Strabon.
114 Thalès.
115 Gartner.



NOMENCLATURE DES RÉGIONS LUNAIRES
Mers ou plaines, cirques, chaînes de montagnes et cratères

CIRQUES ET CRATÈRES
DE LA RÉGION ORIENTALE.

116 Newton.
117 Gruemberger.
118 Klaproth.
119 Casatus.
120 Blancanus.
121 Scheiner.
122 Wilson.
123 Kircher.
124 Bettinus.
125 Zuchius.
126 Segner.
127 Clavius.
128 Longomontanus.
129 Wilhelm.
130 Schiller.
131 Phocylides.
132 Wargentin.
133 Schickard.
134 Inghirami.
135 Tycho.
136 Heinsius.
137 Hell.
138 Gauricus.
139 Wurzelbauer.
140 Cichus.
141 Capuanus.
142 Hainzel.
143 Ramsden.
144 Vitello.
145 Fourier.
146 Vieta.
147 Piazzi.
148 Lagrange.
149 Bouvard.
150 Arzachel.
151 Alpetragius.
152 Thebit.
153 Pitatus.
154 Hésiode.
155 Kies.
156 Mercator.
157 Campanus.
158 Bouillaud.
159 Lubiniezky.
160 Hyppalus.
161 Doppelmayer.
162 Gassendi.
163 Mersenne.
164 Cavendish.
165 Billy.
166 Fontana.
167 Alphonse.
168 Ptolémée.
169 Herschel.
170 Mœsting.
171 Lalande.
172 Davy.
173 Guerike.
174 Parry.
175 Bonpland.
176 Landsberg.
177 Letronne.
178 Flamsteed.
179 Hansteen.
180 Damoiseau.
181 Grimaldi.
182 Riccioli.
183 Lohrmann.
184 Hévélius.
185 Pallas.
186 Soemmering.
187 Schroeter.
188 Stadius.
189 Ératosthènes.
190 Gambart.
191 Reinhold.
192 Copernic.
194 Tobie Mayer.
195 Encke.
196 Kepler.
197 Marius.
198 Reiner.
199 Cavalerius.
200 Olbers.
201 Vasco de Gama.
202 Autolychus.
203 Archimède.
204 Tymocharis.
205 Gay-Lussac.
206 Pytheas.
207 Lambert.
208 La Hire. — Euler.
209 Diophante.
210 Delisle.
211 Aristarque.
212 Hérodote.
213 Seleucus.
214 Briggs.
215 Lichtenberg.
216 Aristille.
217 Pico.
218 Helicon.
219 Sharp.
220 Mairan.
221 Gérard.
222 Platon.
223 Fontenelle.
224 Maupertuis.
225 Lacondamine.
226 Bianchini.
227 Repsold.
228 Pythagore.
229 Timaüs.
230 Anaxagore.



CARTE TOPOGRAPHIQUE
DE LA LUNE
Dressée et dessinée par E. Guillemin
d'après la carte de Beer et Mædler, et les photographies de W. de la Rue et de J. Nasmyth.

Combien la Terre ne nous paraîtrait-elle pas différente d'elle-même, si nous la voyions dépouillée des formations tertiaires et sédimentaires, ainsi que des terrains de transport[1] ! »

L'enceinte montagneuse de la Bohême, d'une forme moins régulière, il est vrai, que les grands cirques de la Lune, les rappelle néanmoins, et par la forme et par les dimensions (son grand axe mesure 300 kilomètres).

Nous avons vu qu'un assez grand nombre des cirques et des cratères lunaires renferment à leur intérieur des montagnes isolées en forme de pics ou de pyramides. Il en est même où l'on observe plusieurs sommets de ce genre : ainsi, l'enceinte de Copernic présente six montagnes centrales. Circonstance singulière, aucune de ces aspérités n'atteint en hauteur les bords de l'enceinte ; la plupart même sont à un niveau inférieur à celui de la surface lunaire d'où le cratère est sorti. D'après Mædler et Jules Schmidt, un grand nombre de montagnes centrales ont une altitude inférieure de 2000 mètres au bord moyen du rempart circulaire; leurs sommets sont encore à 200 mètres au-dessous du niveau moyen du sol dans cette partie de la Lune. Humboldt, en citant ces faits, rapporte l'opinion de Léopold de Buch, qui ne regarde pas ces masses comme produites par l'éruption volcanique, et les

1. Si, comme on le verra plus loin, il n'y a sur la Lune ni air ni eau, les principales causes de déformation et de destruction des formations primitives ont fait défaut à la surface de notre satellite. Comme le dit fort bien M. Henri Lecoq (dans sa notice *sur l'Analogie et les différences qui existent entre les cirques de la Lune et les cratères de l'Auvergne*), « son disque doit offrir intacts et parfaitement conservés les moindres détails de ses dernières catastrophes.... Il est donc nécessaire, pour établir une comparaison entre les cratères de la Lune et ceux de la Terre, de supprimer par la pensée et les sédiments et les mers qui recouvrent la Terre. La tendance de l'eau et des matériaux qu'elle entraîne est de niveler et de combler toutes les cavités qui peuvent exister, et l'on ne peut douter que lors de la consolidation des terrains primitifs, quel que soit le mode de leur formation, il n'ait existé sur notre planète un grand nombre de cirques aujourd'hui comblés. » C'est, comme on voit, l'opinion de Humboldt précisée.

assimile « aux grands dômes trachytiques, fermés au sommet, qui sont répandus en si grand nombre à la surface de la Terre, tels que ceux du Puy-de-Dôme et du Chimborazo. »

Nous avons essayé de donner une idée des hypothèses proposées pour expliquer la formation des montagnes de la Lune. Mais il ne faut pas oublier que ce sont là seulement des hypothèses et que les opinions des savants qui se sont occupés de cette question difficile ne sont pas concordantes. Les uns, comme Beer et Mædler, en parlant des réactions internes et des dislocations ou fractures qui en ont dû être la conséquence, ne spécifient point la nature de la force qui a produit de tels effets. D'autres l'ont assimilée à la force élastique de gaz ou de vapeurs, tels que la vapeur d'eau; d'autres encore, comme Nasmyth et Carpenter, l'ont regardée comme due à la solidification de la croûte qui, se contractant par le refroidissement, détermine une expansion de la matière encore liquide. Le professeur Dana a émis l'idée de l'action de certaines combinaisons chimiques à base sulfureuse qui donnent lieu à la formation de gaz. La force élastique de ces gaz aurait joué, dans la formation des volcans lunaires, le rôle que joue la vapeur d'eau dans les phénomènes éruptifs des volcans terrestres. Enfin, des expériences faites par M. Mattieu Williams sur le refroidissement de masses métalliques en fusion (mélange d'escarbilles de fonte de fer et de silicates) ont permis à ce savant de reproduire en miniature la formation de cratères pareils à ceux de la Lune. Dans ce cas, c'est l'expansion des gaz enfermés par la croûte solide, qui détermine l'éruption de la matière[1].

La figure 132 montre, d'après Nasmyth et Carpenter, la façon dont se forment, d'abord les cirques et leurs remparts externes, puis les cônes intérieurs, lorsque la force interne a diminué d'intensité.

1. Voyez, pour plus de développements sur ces divers points, le bel ouvrage de Nasmyth et Carpenter, *The Moon;* et, dans le numéro de mars 1873 des *Monthly Notices*, *The Origin of Lunar volcanoes*.

On voit aussi, sur la Lune, des pics ou pyramides solitaires, en dehors des enceintes cratériformes. C'est ainsi qu'au sud-est de Platon, ce cirque si remarquable par la teinte sombre de son fond plat, se dresse isolé un pic gigantesque, Pico, dont la cime s'élève à 2200 mètres au-dessus de la plaine qui l'entoure. A la vérité, Pico semble un débris échappé à la ruine d'un cirque comblé dont on voit encore les bords émerger du fond de la Mer des Pluies, au sud de Platon.

Une disposition très-fréquente des montagnes lunaires con-

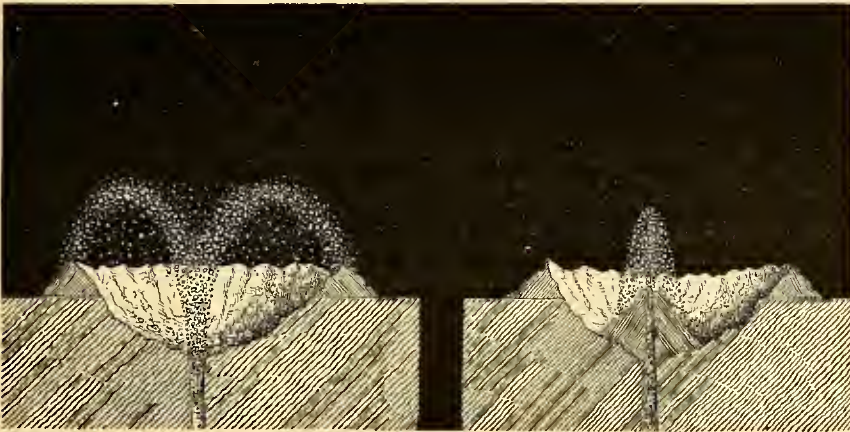


Fig. 132. Formation éruptive des cirques lunaires et de leurs cônes intérieurs, d'après Nasmyth et Carpenter.

siste dans l'existence de cratères parasites formés postérieurement aux cirques et cratères principaux, le plus souvent sur les bords de leurs enceintes. On peut en voir un grand nombre dans le dessin que nous donnons des environs de Tycho, d'après la photographie de M. Warren de la Rue (planche XVIII). Le grand cirque de forme elliptique, Maginus, situé au sud-est de Tycho, est remarquable sous ce rapport. Les bords de ces cratères secondaires empiètent même souvent les uns sur les autres; et il en résulte des séries de déformations qui permettent aisément de les ranger par ordre d'ancienneté. Or,

en opérant cette classification par âges successifs, on retrouve la loi que nous avons énoncée plus haut, d'après laquelle les plus petits cratères sont presque toujours les plus récents.

Il nous reste maintenant, pour terminer cette étude des formations successives du sol lunaire, à dire ce qu'on sait de certains accidents connus sous les noms de *bandes lumineuses*,



Fig. 133. Cratères rayonnants de Copernic, d'Euler de Képler et d'Aristarque.

de *cratères rayonnants* et de *rainures* ou plutôt quelles conjectures on a formées sur leur origine.

Qu'on veuille bien se reporter au dessin des planches XV et XVIII, on verra partir des deux points principaux, Tycho et Copernic, une série de rayons lumineux qui, traversant les montagnes et les taches voisines, s'étendent à une grande distance des centres étoilés. Plus de cent bandes lumineuses divergent ainsi de Tycho. Aristarque, Copernic, Képler, les Carpathes, offrent des systèmes analogues qui semblent se rejoindre et se relier les uns aux autres (fig. 133). Ces singulières

apparences, dont on n'a pu donner encore une explication bien satisfaisante, ne sont bien visibles qu'aux environs de la pleine Lune. Elles disparaissent en grande partie pendant les autres phases, ce qui semble démontrer qu'elles ne sont point formées d'aspérités, puisqu'elles projetteraient alors des ombres et seraient au contraire nettement visibles. Doivent-elles leur origine aux éruptions des volcans qui occupent leur centre? S'il en est ainsi, ces bandes lumineuses seraient-elles autant de fentes remplies après coup de matières blanchâtres et cristallines, et formant ainsi à la surface même du sol autant de filons légèrement lumineux? Selon les vues de J. Chacornac, les cirques ou cratères à centres rayonnants ont une origine relativement récente. Lors de l'éruption qui a produit ces cirques, les masses gazeuses, en s'échappant par les cavités volcaniques nouvelles et en se précipitant dans le vide, ont balayé sur leur passage les matières pulvérulentes et blanchâtres qui recouvraient les sommités des cratères voisins, d'origine antérieure; de là ces longues bandes blanches qui rayonnent, de Tycho, dans la direction des méridiens ayant ce volcan pour pôle commun. Cette explication des bandes lumineuses singulières qui partent de Tycho, de Proclus, d'Aristarque, de Copernic et d'Euler, jettera peut-être quelque jour sur la constitution physique de notre satellite[1].

1. Pour expliquer les bandes rayonnantes, MM. Nasmyth et Carpenter comparent le globe lunaire à celui d'une sphère de glace encore liquide à l'intérieur, que la pression interne aurait fait éclater en un de ses points. Les fentes de cette immense rupture auraient été remplies ensuite par la masse liquide, et les bandes rayonnantes se trouveraient de la sorte assimilées à d'immenses filons. Récemment, M. Ch. Lamey (de Dijon) a proposé une explication qui rappelle celle de Chacornac, avec cette différence que la matière projetée serait liquide. « Les bulles gigantesques, dit-il, qui ont formé les cratères lunaires ont lancé de tous côtés, en éclatant à la surface, de la matière liquide provenant de l'intérieur, laquelle est venue s'abattre sur le sol en longues bandes rayonnantes. » (*De la nature et de la formation des bandes rayonnantes de la Lune.*) La place nous manque pour discuter les explications précédentes et exposer les objections qu'elles suggèrent.

Les *rainures* diffèrent des bandes lumineuses en ce qu'elles sont évidemment formées de deux talus parallèles, très-raides et sans remparts, laissant entre eux une sorte de fossé rectiligne. Blanches dans la pleine Lune, elles apparaissent dans les autres phases comme des lignes noires, l'un des deux bords projetant son ombre sur le fond de la rainure (fig. 123).

On crut d'abord y voir d'anciens lits de rivières desséchées; mais la forme de ces sillons, souvent plus larges au milieu qu'aux extrémités, leur immense largeur qui atteint jusqu'à 2 kilomètres, et plus encore leur profondeur, qui varie entre 400 et 600 mètres, n'autorisent pas une semblable hypothèse. D'ailleurs la longueur des rainures est relativement faible; elle reste comprise entre 16 et 200 kilomètres. Enfin, une circonstance qui se présente fréquemment et qui montre bien qu'il n'est pas possible d'y voir d'anciennes rivières, c'est que plusieurs rainures traversent des montagnes et coupent les bords de cratères élevés, de manière à offrir les niveaux les plus divers. Quelques-unes s'élargissent dans leur parcours, et forment des sortes de vallées ovales. D'autres, enfin, présentent une série de petits cratères reliés les uns aux autres. Nous reproduisons ici, dans la planche XIX, et d'après la belle carte de Mædler, deux régions de la partie montagneuse centrale de la Lune, qui contiennent quelques-unes des rainures les plus singulières.

Beer et Mædler, dans la remarquable étude qu'ils ont publiée et étendue à 70 rainures inconnues avant eux[1], signalent comme un fait important la similitude de direction de la plupart d'entre elles. Tout fait croire que ces singuliers accidents sont le produit de forces naturelles, et non, comme on l'avait aussi supposé, des constructions artificielles, des sortes de canaux, œuvres des habitants de la Lune. Elles semblent dater de la dernière époque de formation de la surface lu-

1. Schrœter, Pastorff, Gruithuysen et Lohrmann précédèrent les deux savants astronomes allemands dans ces découvertes intéressantes.

1.



2.



TOPOGRAPHIE LUNAIRE

D'après la *Mappa Selenographica* de G. Beer et J. Mædler.

1. Cirques, cratères et collines du S. O. Rainure entre Abulfeda et Almanon.
2. Rainures de la région centrale dans les environs N. O. de Sinus Medii.

naire, et sont dès lors postérieures aux cratères et aux cirques, comme le prouve la rainure d'Hyginus, qui pénètre à l'intérieur de ce cratère en brisant les parois de son enceinte.

Nous ne pouvons terminer ce que nous avions à dire de la constitution géologique de la Lune, sans parler d'un problème d'un haut intérêt, qu'on s'est posé il y a déjà longtemps, mais que des observations toutes récentes ont remis à l'ordre du jour. Puisque le sol de notre satellite accuse partout l'influence de l'action volcanique ou éruptive, cette action a-t-elle cessé ou se manifeste-t-elle encore aujourd'hui? Y a-t-il, actuellement, des volcans en activité à la surface de la Lune? Des points brillants jadis aperçus sur le disque avaient d'abord fait croire à l'affirmative; l'éclat de certains cratères, notamment d'Aristarque, qui restait visible avec une teinte rougeâtre pendant les éclipses de Lune, semblait confirmer l'hypothèse qu'il y a encore sur notre satellite des volcans en ignition. Mais on reconnut bientôt qu'il s'agissait là, uniquement, d'un pouvoir réfléchissant très-intense, et particulier à la nature des cratères observés. Depuis, divers observateurs ont cru constater des changements dans la forme et la disposition de certaines aspérités lunaires, par exemple du cratère Marius, des environs de Cichus, de Messier[1].

Enfin, en octobre 1866, le directeur de l'observatoire d'Athènes, M. Julius Schmidt, constatait la disparition d'un petit cratère situé dans la Mer de la Sérénité, et qu'il avait, à diverses reprises, observé antérieurement. Plusieurs astronomes, MM. Secchi, Wolf, Huggins, étudièrent avec soin ce cratère, dont le nom est Linné, et il a paru résulter de la discussion des observations, de leur comparaison avec les descriptions et

1. Voyez, à ce sujet, l'ouvrage de deux astronomes anglais, MM. Webb et Birt, *Celestial objets for common telescope;* l'*Annuaire scientifique de P. P. Dehérain pour* 1868, et notre monographie de la LUNE.

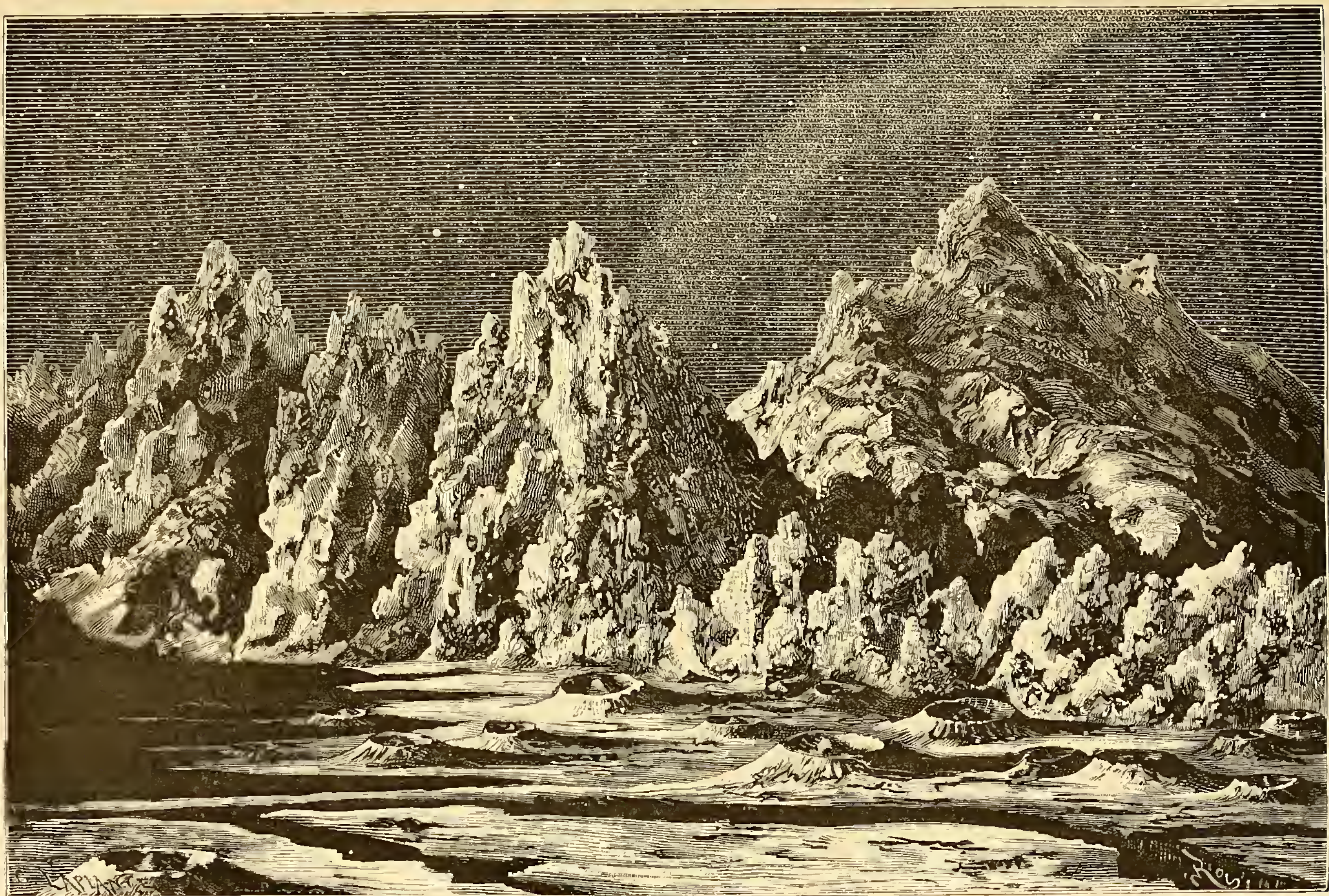
les dessins antérieurs, qu'il a subi des changements dont la date remonterait à peu d'années : le cratère aurait été, en partie, comblé par l'éruption d'une matière blanchâtre qui, se répandant extérieurement, aurait fait disparaître le rempart primitif. Depuis cette époque, Linné a été observé soigneusement par de nombreux astronomes, sans qu'on ait pu positivement constater des modifications autres que celles produites par les conditions très-variables de l'illumination. Il reste donc douteux que l'action éruptive continue encore à se manifester sur notre satellite, et c'est toujours une question de savoir si, pour nous servir d'une expression de M. Élie de Beaumont, « la vie géologique existe encore dans l'intérieur de la Lune aussi bien que dans l'intérieur de la Terre. »

§ 6. MÉTÉOROLOGIE LUNAIRE. — LA LUNE A-T-ELLE UNE ATMOSPHÈRE?

J'ai supposé plus haut un habitant de la Terre abordant sur ce sol bouleversé, hérissé de montagnes et couvert de milliers de bouches volcaniques. Je l'ai montré contemplant avec étonnement ce monde étrange. Mais, ce que je n'ai point dit encore et ce qui rendrait son séjour plus que pénible, impossible, c'est qu'il ne trouverait pas à la surface de la Lune les éléments les plus indispensables à son existence, l'air et l'eau.

La Lune n'a pas d'atmosphère.

Ce fait semble démontré par les occultations d'étoiles. Lorsque, par le mouvement propre de la Lune à travers les constellations, un des points lumineux de la voûte étoilée vient à passer derrière le bord obscur du disque lunaire, il s'éteint soudainement, sans qu'aucune diminution graduelle de sa lumière accuse l'interposition d'une enveloppe gazeuse. Ce fait s'observe pour les plus petites comme pour les plus grandes étoiles, au milieu des éclipses de Lune, alors que l'atmosphère terrestre n'est plus illuminée par les rayons de notre satellite.



PAYSAGE LUNAIRE

Vue idéale prise dans la région des Apennins.

Si, d'ailleurs, une atmosphère enveloppait le sphéroïde lunaire, quelque faible que fût sa densité, cette atmosphère serait réfringente, et par suite une étoile, après son immersion réelle derrière le disque, resterait visible encore un instant. De même, elle redeviendrait visible un peu avant sa sortie ou son émersion. De sorte que la durée du phénomène de l'occultation serait, pour cette double raison, moindre que la durée assignée par le calcul et déduite de la connaissance précise et mathématique du mouvement de l'astre. Or, rien de pareil n'a pu être constaté. Il résulte de là que, si l'atmosphère de la Lune existe, sa densité est moindre, on l'a calculé, que la 2000e partie de la densité de l'atmosphère terrestre. Elle est plus rare que le vide qui subsiste, après une manœuvre aussi complète que possible, sous le récipient des machines pneumatiques les plus perfectionnées.

La seule objection qu'on puisse faire aux conséquences tirées du fait précédent, c'est, comme Arago l'a remarqué, que le diamètre apparent de la Lune n'est peut-être pas connu avec une suffisante précision [1]. J'ajouterai une remarque personnelle. On sait que les bords lumineux du croissant lunaire forment à l'extérieur une ligne en apparence continue, tandis que, vers le centre, l'ellipse terminale marquant la sépara-

1. En se plaçant à ce point de vue, un savant anglais, M. Neison, a repris récemment (*Monthly Notices*, 1873) la question de la possibilité de l'existence d'une atmosphère lunaire. Il prend pour point de départ le fait, constaté par M. Airy, d'une différence de 2″ entre le demi-diamètre de la Lune, mesuré directement au télescope, et le même demi-diamètre déduit des occultations d'étoiles. Tout en faisant la part que l'irradiation doit avoir dans cette différence, il pense que l'on peut assigner 1″ environ à la réfraction horizontale due à cette atmosphère supposée. Dans cette hypothèse, et en adoptant la loi la plus vraisemblable sur le décroissement de densité et de température avec l'altitude, M. Neison trouve pour la densité de l'atmosphère lunaire à la surface (à une température moyenne de 25°) le nombre 0.0025, la densité de l'air à la surface de la Terre à 0° et à la pression 760 étant prise pour unité. Cette densité et la réfraction qui lui correspond varient d'ailleurs avec la température, laquelle à la surface de la Lune varie elle-même de plus de 200° d'une lunaison à l'autre, comme on le verra plus loin.

tion de la lumière et de l'ombre est profondément dentelée. La raison de cette différence est aisée à comprendre : les sommets des cratères et des pics situés au bord du disque forment des séries de dentelures qui se recouvrent par l'effet de la perspective, et en définitive donnent un profil régulier et uniforme; au centre du disque, au contraire, les aspérités se présentent à nous de face, à vol d'oiseau pour ainsi dire, de sorte que les sommets éclairés par la lumière du Soleil ressortent sur le fond obscur des plaines. Mais, quoi qu'il en soit de cette différence, l'uniformité du profil circulaire est-elle assez complète pour que, dans une occultation d'étoile, on puisse arguer d'une différence que l'on trouverait entre l'observation et le calcul, et conclure à l'existence d'une atmosphère lunaire? Est-il vrai que cette atmosphère soit confinée au fond des plaines les plus basses et des cratères les plus profonds? Rien ne prouve ni ne contredit cette hypothèse. Ce qui est certain, c'est qu'il ne se forme point de vapeurs visibles à la surface de la Lune, c'est qu'aucun nuage n'y ternit jamais la pureté de son ciel : des nuages, même de faibles dimensions, seraient aisément aperçus de la Terre[1]. Ajoutons,

1. D'autres moyens existent encore pour s'assurer si la Lune a ou n'a point d'atmosphère. A la distance où nous sommes de notre satellite, distance assez petite pour que nous puissions observer la clarté que la lumière de la Terre donne à ses nuits, les crépuscules doivent être aisés à reconnaître. La ligne de séparation de la lumière et de l'ombre, au lieu d'être nettement tranchée, doit se fondre par une teinte lumineuse d'intensité décroissante du côté de la partie obscure du disque. Or là, l'observation montre bien des inégalités, des dentelures; mais elles sont très-nettement détachées et n'accusent évidemment que de grandes différences dans les niveaux d'un sol montagneux et accidenté. Schrœter seul paraît avoir observé un crépuscule lunaire, en constatant, sur l'extrémité des cornes du croissant, une lueur qui allait en s'affaiblissant du côté de la partie obscure du disque. Schrœter concluait de ce fait à l'existence d'une atmosphère de la Lune, dépassant de 450 mètres environ le niveau moyen des plaines.

Enfin quand on examine les ombres portées par les pics, les cratères et en général toutes les élévations si nombreuses dans certaines régions de la Lune, on remarque que ces ombres sont nettement et partout également

enfin, que l'analyse spectrale de la lumière de la Lune n'a révélé aucune différence entre cette lumière et celle du Soleil. M. Janssen, à Rome, MM. Huggins et Miller, en Angleterre, n'ont pu constater que des différences d'intensité, suivant les régions du disque examinées : aucune bande ou raie nouvelle n'a pu être constatée dans le spectre lunaire[1]. On voit, en résumé, que les plus fortes raisons concourent à prouver que notre satellite est privé d'atmosphère, ou du moins, s'il en a une, qu'elle est d'une ténuité extrême, si faible que les conséquences dont nous allons maintenant parler, resteraient pour ainsi dire entières.

L'absence d'air à la surface de la Lune implique l'absence d'eau. S'il existait des lacs, des mers, ou simplement des rivières, les liquides qui formeraient ces réservoirs ou ces courants se réduiraient spontanément en vapeur, par le fait seul qu'ils ne seraient point maintenus par une pression atmosphérique. Mais la chaleur solaire agissant plus énergiquement encore, il en résulterait une enveloppe gazeuse, des nuages épais de vapeur. Or, ni à la vue simple, ni à l'aide des télescopes les plus puissants, on n'a pu reconnaître, parmi les taches dont le disque lunaire est parsemé, rien qui indique l'existence du moindre nuage. Jamais la netteté de leurs formes n'a paru altérée par le moindre accident, et l'on sait

accusées au sommet comme à la base des montagnes; nulle part elles ne présentent cette dégradation dans les teintes, qui serait la conséquence naturelle de l'interposition de couches gazeuses ayant une densité croissante.

2. « Si de la matière finement divisée, aqueuse ou autre, est présente autour de la Lune, dit M. Huggins, les raies rouges de la lumière solaire devraient être un peu moins affaiblies que les raies de réfrangibilité plus élevée. S'il y a autour de la Lune une atmosphère libre de toute vapeur et sans pouvoir absorbant, mais suffisamment dense, le spectre ne sera pas éteint au même instant sur toute sa longueur. Les rayons violets et bleus subsisteront après la disparition des rayons rouges. J'ai observé avec le plus grand soin la disparition du spectre de l'étoile ε des Poissons, lors de son occultation le 4 janvier 1865, dans le but de surveiller ces divers phénomènes, mais je n'ai découvert aucun signe d'atmosphère lunaire. »

qu'un nuage de cent mètres de diamètre serait aisément visible. Pas de traces de bandes sombres ou brillantes comme dans Jupiter, de taches mobiles comme dans Mars. Le ciel de la Lune est évidemment d'une sérénité absolue.

Point d'air et point d'eau! C'est l'absence forcée des vents et des courants, c'est l'immobilité partout, dans le ciel comme sur le sol. Tout au plus, sous l'influence des alternatives de



Fig. 134. Vue intérieure d'un cirque, d'après un dessin de Nasmyth.

chaleur et de froid, la désagrégation des matières et la rupture d'équilibre des corps pesants entraînant la chute de débris de roches, rompent la monotonie d'une immobilité et d'un silence éternels. Car le son, ne pouvant s'y propager par aucun milieu aérien, se transmet seulement au contact, par les vibrations des molécules solides. Pour un habitant de la Terre, l'astre des nuits ne serait, selon l'expression de Humboldt, qu'un désert silencieux et muet.

Les paysages lunaires ont donc un aspect tout particulier.

Là, les ombres ont partout la même intensité, aux premiers comme aux derniers plans. Tout au plus, la crudité des tons brillants et lumineux qui se détachent sur un ciel presque noir, sur des ombres noires aussi, y est-elle tempérée par les reflets, d'ailleurs fort nombreux dans un sol aussi accidenté. Là, pas de perspective aérienne; point de ces jeux de lumière, de ces teintes vaporeuses qui donnent aux paysages terrestres tant de charme et de douceur. La réfraction n'y décompose pas la lumière blanche en sept couleurs et en mille nuances variées, l'arc-en-ciel et les phénomènes du même genre sont inconnus à la surface de la Lune. Mais en revanche, les étoiles et les autres astres brillent en plein jour dans la voûte céleste. La planche XX et la gravure 134 donneront une idée de l'aspect du paysage dans les parties montagneuses de la Lune.

On a vu plus haut que les larges taches sombres, que les premiers observateurs prirent pour des mers, sont aujourd'hui considérées comme de vastes plaines, inférieures de niveau aux vallées des contrées montagneuses. Ce qui a dû d'abord ajouter à l'illusion, c'est que plusieurs de ces taches offrent une couleur vert sombre. Mais d'autres sont grises, rougeâtres, ou encore d'un gris foncé, comme l'acier. L'absence des mers, des eaux et par conséquent des pluies est d'autant plus probable qu'elle explique à merveille, on l'a vu plus haut, la forme actuelle du sol de la Lune, la géologie de ses couches superficielles. Il importe cependant de distinguer entre les régions montagneuses et les régions des plaines. Ces dernières offrent un sol beaucoup plus uniforme, et il paraît probable que la surface lisse et polie des plaines ou des mers lunaires, est due à l'irruption des matières encore liquides ou pâteuses qui les ont comblées.

Le climat de notre satellite ne doit pas être moins extraordinaire que sa constitution géologique. Pendant près de quinze jours de suite, le Soleil y darde ses rayons, sans qu'aucun rideau nuageux, sans qu'aucun courant aérien vienne en

tempérer l'ardeur. A cette température, plus intense que celle de notre zone torride, succède un froid rigoureux, qu'une nuit de quinze jours doit rendre plus glacial que le froid de nos hivers polaires. Il est vrai de dire que, pendant le jour, le rayonnement de la chaleur solaire se fait sans obstacle dans le vide des espaces célestes. Il est permis d'en conclure que les climats des diverses régions de la Lune ont une certaine analogie avec ceux des régions alpestres ; de sorte que l'élévation de la température, et la réverbération d'une lumière intense, y deviennent surtout insupportables par la continuité de leur action. Ces conjectures se trouvent corroborées par des expériences directes faites sur le rayonnement lunaire. Dans l'intervalle d'une lunaison la température d'un point de la surface s'élève jusqu'à 260 degrés centigrades pendant le jour lunaire, pour s'abaisser pendant la nuit à 30 degrés au-dessous de zéro [1].

Il n'y a pas, à proprement parler, de saisons sur la Lune. La faible inclinaison de son axe de rotation maintient le Soleil à une inclinaison presque constante sous chaque latitude. Mais tandis que dans les régions équatoriales, l'astre radieux ne s'éloigne guère du zénith au milieu du jour, dans les régions polaires son disque s'élève à peine au-dessus de l'horizon. Les montagnes des pôles y jouissent en revanche d'une lumière perpétuelle. « Le Soleil ne descend au-dessous du véritable horizon d'un pôle lunaire, que tout au plus d'une quantité égale à l'inclinaison de l'équateur de la Lune, c'est-à-dire de $1^{0}\,30'$; mais la petitesse du globe de notre satellite fait que,

1. Melloni a, le premier, constaté l'action calorifique des rayons lunaires à la surface de la Terre. Piazzi Smyth, puis nos compatriotes, MM. Marié Davy et Baille, l'ont mesurée après lui ; lord Rosse a, de plus, montré que c'est principalement de la chaleur obscure, de sorte que les rayons solaires reçus par la Lune sont d'abord absorbés par le sol de notre satellite, puis diffusés comme chaleur obscure. C'est ce dernier savant qui évalue la température de la Lune à 300° Fahr. (260° centigr.).

déjà à une élévation de 600 mètres, on voit 1° 30′ au-dessous de l'horizon vrai. Or, il existe au pôle nord des montagnes de 3000 mètres, et au pôle sud de plus de 4000 mètres de hauteur. Par conséquent, le sommet de ces montagnes ne peut jamais être caché à la lumière du Soleil. » (Beer et Mædler, *Fragments sur les corps célestes du système solaire.*)

Tout ce qu'on vient de lire sur la constitution physique de la Lune s'applique expressément à son hémisphère visible. Est-il permis d'en étendre les conclusions à l'hémisphère que nous ne voyons jamais? Les hypothèses de tout genre faites sur cette autre moitié, et relatives à la différence de sa constitution physique avec la moitié visible, ont-elles un degré quelconque de probabilité[1] ? Non, il est aisé de voir que la plupart de ces hypothèses, inadmissibles en tant qu'elles sont de simples produits de l'imagination et ne reposent sur aucune observation exacte, ne prouvent qu'une chose, à savoir que leurs auteurs ont ignoré le vrai mouvement de la Lune autour de la Terre. Mais il ne faut pas confondre les romans scientifiques avec les résultats d'une analyse rigoureuse. Un des géomètres contemporains qui ont le plus contribué aux progrès de la difficile théorie de la Lune, Hansen, a démontré que le centre de gravité du globe lunaire[2] doit être situé en arrière

1. Les anciens, par exemple, supposaient l'hémisphère invisible de forme concave, ou encore à moitié transparent. Des modernes se sont imaginé qu'il possédait l'atmosphère, l'eau, les habitants dont semble manquer la moitié tournée vers nous, et que celle-ci a seule le privilége ou le désavantage, comme on voudra, d'être hérissée d'aspérités abruptes et rocailleuses.

2. L'hypothèse d'abord toute gratuite, d'une constitution différente de l'hémisphère invisible de la Lune, s'est en effet trouvée, il y a quelque temps, étayée par l'autorité considérable de l'illustre astronome contemporain que nous venons de nommer. Voici comment : nous avons vu déjà plus haut, que le globe lunaire est regardé comme ayant la forme d'un ellipsoïde allongé, dont le plus grand diamètre serait dirigé vers la Terre : cette forme, déterminée à l'origine par l'action de la gravité terrestre sur le globe, fluide encore, de la Lune, expliquerait en même temps l'égalité si parfaite de la durée de la rotation et de la révolution sidérale de notre satellite. Des considéra-

de son centre de figure. Il résulte de là que si une atmosphère existe autour de notre satellite, elle doit être excentrique, plus allongée ou plus épaisse du côté opposé à la Terre que dans l'hémisphère visible. Les gaz ou vapeurs qui pourraient se former dans celui-ci auraient donc une tendance à se transporter dans l'hémisphère invisible.

Quant à une différence dans la structure géologique des deux hémisphères, rien ne peut la faire considérer comme probable; voici les raisons qui permettent, au contraire, de regarder les deux moitiés de la surface lunaire comme identiques sous ce rapport.

Nous avons vu, en effet, que les diverses librations lunaires font que sur 1000 parties de la surface de notre satellite, 424 seulement restent définitivement et absolument cachées, 576 sont visibles pour nous. De l'est à l'ouest, la partie de la Lune à jamais inconnue pour la Terre embrasse 1118 lieues; du nord au sud, 1135 lieues; de la latitude boréale de 40° à la même latitude australe, 1083 lieues : tandis que les mêmes dimensions, calculées pour la surface visible, sont respectivement de 1333, de 1317 et de 1367 lieues (Beer et Mædler). Toute une zone, assez large d'ailleurs, de la moitié de la Lune qui est à l'opposé de la Terre, est donc ac-

tions théoriques sur les inégalités lunaires ont conduit M. Hansen plus loin : il a cru pouvoir établir que le centre de gravité de l'ellipsoïde lunaire est plus éloigné de la Terre d'environ 59 kilomètres que son centre de figure. Il en résulterait, suivant lui, que « l'hémisphère tourné vers nous s'élève beaucoup plus au-dessus du niveau moyen que ne le fait l'hémisphère opposé; et quoique celui-là se présente à nous comme une contrée stérile, exempte d'une atmosphère et de tout être vivant, on ne peut plus conclure que l'autre hémisphère ne soit doué d'une atmosphère, et qu'il n'y ait de végétation et d'êtres vivants. Aux bords de la Lune doit régner à peu près le niveau moyen, et, en effet, on ne peut pas dire que là il ne se serait montré aucune trace d'une atmosphère. » (Hansen, *Mém. de la Société astron. de Londres*, 1854.) Ajoutons qu'une objection capitale a été faite par M. S Newcomb aux vues d'Hansen, et que M. Delaunay l'a également combattue. Ce qui reste généralement admis, c'est la forme allongée du globe lunaire.

cessible aux yeux de l'homme. Or, « les observations ne nous ont fait apercevoir — ce sont toujours les deux plus laborieux explorateurs de la Lune qui parlent — aucune différence essentielle entre ces contrées qui forment la septième partie de la surface lunaire cachée à nos regards et celles que nous connaissons : on y trouve les mêmes pays de montagnes et les mêmes *mare* » (les plaines appelées *mers*). De là à conclure la similitude des parties invisibles, il n'y a qu'un pas.

J'ai dit, de la partie actuellement invisible, qu'elle est *à jamais inconnue pour la Terre*. Cela résulte de l'analyse savante de Laplace[1].

§ 7. ASTRONOMIE POUR UN HABITANT DE LA LUNE. DURÉE DES JOURS ET DES NUITS.

Pour terminer la description des particularités physiques qui font de la Lune un corps si différent du globe que nous habitons, voyons si les phénomènes astronomiques sont les mêmes pour elle que pour la Terre. Sans examiner la question intéressante, mais jusqu'ici à peu près insoluble, de l'existence d'êtres vivants et organisés à la surface du satellite de notre petit monde[2], nous supposerons un observateur successivement placé dans chacun de ses hémisphères.

1. En voici les conclusions : « La cause qui a établi une parfaite égalité entre les moyens mouvements de rotation et de révolution de la Lune, ôte pour jamais aux habitants de la Terre l'espoir de découvrir les parties de la surface opposée à l'hémisphère qu'elle nous présente. L'attraction terrestre, en ramenant sans cesse vers nous le grand axe de la Lune, fait participer son mouvement de rotation aux inégalités séculaires de son mouvement de révolution, et dirige constamment le même hémisphère vers la Terre. »

2. D'autres, plus hardis que nous, trancheront sans doute la difficulté. Ils avanceront, avec de grandes chances d'être crus sur parole, qu'un être organisé ne peut vivre sans air et sans eau, et que les conditions climatologiques de la Lune sont évidemment destructives de tout organisme. Nous ne les contredirons pas. Mais la raison de notre réserve n'est pas moins aisée à

Les phases de la Lune prouvent qu'elle présente tous les points de sa sphère au Soleil dans un intervalle de 29 jours 53 centièmes, ou si l'on préfère de 709 heures environ. Chacun de ces points reçoit donc, pendant 354 heures 1/2, la lumière solaire : c'est la durée du jour sur la Lune. Pendant 354 heures 1/2, le même point en est entièrement privé : c'est la durée de sa nuit. Il y a, sous ce rapport, parité presque entière entre les deux hémisphères visible et invisible.

Sur la Lune, les jours et les nuits forment-ils des tableaux aussi variés de nuances que les jours et les nuits terrestres? se succèdent-ils avec des transitions aussi ménagées? Non, et la raison en est aisée à concevoir. L'absence, ou du moins la rareté extrême de l'atmosphère lunaire produit, du jour à la nuit et de la nuit au jour, une transition subite. Je me trompe : la seule dégradation de lumière qu'on y observe est due à la lenteur avec laquelle le Soleil s'élève au-dessus ou s'abaisse au-dessous de l'horizon. Ce n'est que peu à peu que son disque se découvre derrière les plans les plus éloignés du paysage, et il s'écoule près de 10 heures entre le moment où brille le premier point lumineux et celui où le disque entier de l'astre a fait son ascension complète au-dessus de l'horizon : le lever du Soleil est un phénomène qui, sur la Lune, dure près d'une moitié de nos journées, et il en est de même de son coucher.

comprendre. Si, avant d'avoir observé aucun des innombrables êtres vivants qui peuplent les eaux de notre planète, et avant d'avoir entendu parler de leur existence, quelqu'un apprenait tout à coup qu'il est possible de naître, de respirer et de se mouvoir au sein des eaux, s'il s'en rapportait à sa seule expérience qui lui enseigne que l'immersion prolongée dans un liquide est mortelle à tous les animaux qu'il connaît, comme à l'homme lui-même, sans aucun doute, cette nouvelle lui causerait la surprise la plus profonde. Tel serait notre étonnement, si l'on venait jamais à démontrer par d'irrécusables preuves l'existence d'êtres vivants à la surface de la Lune. Mais la nature est si variée dans ses modes d'action, si multiple dans les manifestations de sa puissance, que nous ne voyons rien là d'absolument impossible : contentons-nous donc de regarder l'existence d'êtres vivants à la surface de la Lune comme une hypothèse bien improbable.



LA TERRE VUE DE LA LUNE

Époque de la *Pleine Terre* ou du minuit lunaire.

Le disque de l'astre lumineux s'y montre, d'ailleurs, nettement terminé, et dépourvu de ces rayons qui, sur la Terre, l'environnent à une grande distance. Mais l'atmosphère du Soleil, ses protubérances avec les jeux variés de lumière qu'elles engendrent sur ses bords, sont nettement visibles dans le ciel lunaire, qui partout ailleurs, nous l'avons dit, présente une teinte sombre, et reste en plein jour parsemé d'étoiles. Une fois le Soleil levé, quelle que soit sa hauteur, il projette avec une égale force sa lumière vive et crue sur tous les objets; n'étaient les reflets des aspérités éclairées, montagnes et collines, tout objet plongé dans l'ombre serait, même au milieu du jour, dans de complètes ténèbres, que tempérerait seul l'éclat de la voûte céleste, toute brillante d'étoiles. A la vérité, l'illumination du sol varierait selon les heures du jour, parce qu'une surface éclairée l'est avec d'autant plus de force que l'obliquité des rayons lumineux est moins grande. Pendant la nuit, l'obscurité doit y être si profonde que nos nuits les plus noires ne peuvent en donner une idée. Le ciel, sur la Terre, conserve encore pendant la nuit sa transparence, la teinte foncée des espaces qui séparent les étoiles est toujours colorée et bleuâtre; d'ailleurs, suivant l'heure de la nuit, elle va se dégradant au levant et au couchant. Rien de semblable dans les nuits lunaires; la crudité violente du ton noir que présente le firmament doit être encore accrue par la vivacité des lumières stellaires, et la présence du disque terrestre ne change rien à l'aspect du ciel.

Mais l'intensité de la lumière du Soleil et celle de sa chaleur directe ne sont point tout à fait les mêmes, au milieu du jour, sur chaque moitié de la Lune. En effet, pour les points du méridien lunaire qui nous fait face, il est midi à l'instant précis de la pleine Lune; tandis que, pour l'autre moitié de ce méridien, nos antipodes lunaires, le midi coïncide avec l'instant de la Lune nouvelle. Or, dans la première position, la Lune est plus éloignée du Soleil que dans la seconde, du

double de sa moyenne distance de la Terre. Cela fait, si nous avons bonne mémoire, la 193e partie de la distance de la Terre au Soleil. Aussi le diamètre apparent de ce dernier astre est-il plus considérable, dans le second cas que dans le premier, d'environ 1/193 : sa surface rayonnante est plus grande de 1/95. Mais il y a une compensation dans la longueur moyenne du jour lunaire, plus grande d'une heure 7 minutes pour le méridien central de la face visible.

Pendant les nuits de ce dernier hémisphère, l'observateur lunien verra constamment la Terre sous la forme d'un disque lumineux 14 fois plus grand que celui de la Lune dans notre ciel, et présentant successivement comme elle une série de phases tout à fait analogues. Les nuits n'y seront donc jamais tout à fait obscures, ainsi que le témoigne d'ailleurs la lumière cendrée. A minuit — minuit lunaire — la face dont nous parlons, toujours tournée vers nous, mais invisible parce qu'elle est relativement obscure et se perd dans les rayons du Soleil, aura *Pleine Terre*. Qu'on juge de la lumière qu'elle reçoit ainsi du disque lumineux de notre planète, par celle que nous recevrions, si 14 pleines lunes égales à la nôtre éclairaient en même temps nos nuits. (Voyez planche XXI.)

Au contraire, la Terre est inconnue pour les observateurs supposés de l'hémisphère invisible, et les nuits y sont d'une obscurité dont on peut se faire une idée, si l'on songe qu'aucun crépuscule ne la tempère, et que la seule lumière reçue dans cet hémisphère est celle des étoiles.

Entre ces deux régions, qui forment à elles deux les 6/7 de la surface entière de la Lune, est la zone des bords qui sont tantôt en vue, tantôt invisibles. Pour cette zone, la Terre se couche et se lève; mais son disque n'y monte que très-faiblement au-dessus de l'horizon. Dans l'hémisphère visible, les phases de la Terre, l'observation de ses taches, qui tour à tour paraissent et disparaissent par l'effet de sa rotation, peuvent servir de montre pour la mesure du temps. C'est un cadran,

presque immobile au même point de la voûte étoilée, et comme une lampe immense suspendue en ce point. D'ailleurs les étoiles défilent avec lenteur dans le ciel noir, derrière ce pendule tournant. Quant aux régions qui composent les parties de la Lune invisibles pour la Terre, aussitôt que le Soleil a disparu de leur horizon, elles se trouvent plongées sans transition dans la plus profonde nuit. Pendant 350 heures, un astronome, transporté sous ce ciel si favorable aux études uranologiques, pourrait y observer, sans être gêné par aucun nuage, par aucune lumière étrangère, les étoiles et les planètes : la Voie Lactée, les nébuleuses, la lumière zodiacale, les protubérances solaires que l'on ne peut voir, sur notre Terre, que pendant les éclipses totales de Soleil, seraient d'ailleurs constamment accessibles à l'observation, pendant le jour comme pendant la nuit, sur l'un et sur l'autre hémisphère. Enfin, une autre différence qui caractérise l'hémisphère invisible, c'est que le Soleil n'y est jamais éclipsé, tandis que dans l'atmosphère tourné vers nous, des éclipses solaires peuvent durer jusqu'à deux heures.

V

MARS ♂.

§ 1. MOUVEMENTS APPARENTS ET ORBITE DE MARS.

A une distance du Soleil qui dépasse d'un peu plus de la moitié la distance où la Terre se trouve elle-même du foyer commun, circule la planète Mars, la première des planètes *supérieures*. Son orbite enveloppe complétement l'orbite terrestre, et il en résulte nécessairement qu'au lieu de paraître osciller de part et d'autre du Soleil, comme Vénus et Mercure, sans s'écarter de ses rayons au delà de certaines distances angulaires qui sont leurs élongations maxima, Mars prend toutes les positions possibles relativement à l'astre radieux : tantôt se trouvant dans la même direction que le Soleil, mais au delà, il se lève et se couche à peu près au même instant que lui et devient invisible pour nous : c'est l'époque de sa *conjonction;* tantôt il s'en trouve éloigné, soit à l'Orient, soit à l'Occident, de 90° : c'est l'époque de ses *quadratures;* tantôt enfin, s'éloignant à 180° du Soleil, il passe au méridien vers minuit : c'est l'instant de son *opposition*, parce qu'alors, la Terre étant située entre le Soleil et Mars, la position de la planète dans le ciel est précisément l'opposé de celle qu'occupe le Soleil lui-même.

C'est dans cette dernière période de son mouvement syno-

dique que Mars se trouve dans la situation la plus favorable aux observations, d'abord parce que passant au méridien vers minuit, sa hauteur au-dessus de l'horizon est la plus grande possible aux heures de la nuit où l'obscurité est la plus profonde; ensuite et surtout, parce que Mars est beaucoup plus rapproché de la Terre qu'en tout autre point de sa révolu-

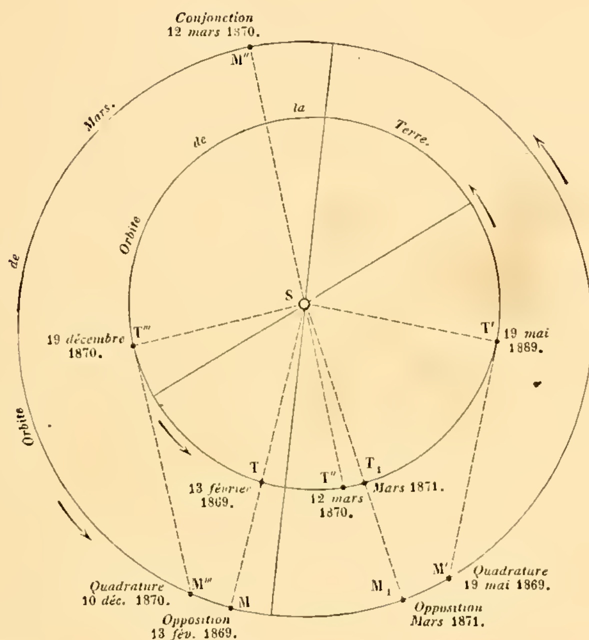


Fig. 135. Mouvements apparents de Mars; ses oppositions, ses conjonctions et ses quadratures.

tion, comme on peut s'en rendre compte en jetant un coup d'œil sur la figure 135.

Alors, en effet, la distance de Mars à la Terre n'est plus, à peu de chose près, que la différence entre leurs rayons vecteurs, c'est-à-dire que la différence entre les distances respectives des deux planètes au Soleil.

Entre deux conjonctions ou deux oppositions consécutives de Mars, il s'écoule en moyenne 779 jours, c'est-à-dire 2 ans et 48 jours 5 dixièmes : telle est la durée de la révolution

synodique, qu'il ne faut pas confondre avec la durée d'une révolution sidérale, temps que Mars met à accomplir autour du Soleil une translation entière. Nous avons déjà vu, en étudiant les mouvements de Vénus et de Mercure, la raison de cette distinction importante, qui tient à la marche simultanée de notre planète et de la planète Mars sur leurs orbites respectives. Comme les mouvements apparents de Mars diffèrent notablement de ceux des planètes inférieures, et qu'ils ressemblent au contraire à ceux des planètes supérieures, Jupiter, Saturne, etc., nous allons montrer rapidement par un exemple comment se succèdent les diverses positions relatives des deux planètes Mars et la Terre, positions dont la période constitue une révolution synodique de Mars.

Le 13 février 1869, Mars se trouvait au point M (fig. 135) de son orbite, et la Terre au point T de la sienne. Le Soleil et Mars se trouvaient occuper relativement à la Terre deux positions opposées, ou, ce qui revient au même, leurs longitudes différaient de 180° : Mars était donc en *opposition*. Le 19 mai de la même année, Mars s'était transporté en M′, la Terre en T′, et l'on voit sur la figure que les lignes menées de la Terre à Mars et au Soleil formaient à cette date un angle droit, les longitudes de la planète et du Soleil différaient de 90° : Mars était donc alors en *quadrature*. A partir de cette époque, les deux planète sont continué leur route, mais la Terre se meut autour du Soleil, avec une vitesse angulaire et une vitesse réelle supérieures à celle de Mars, de sorte que celui-ci dut paraître se rapprocher de plus en plus des rayons du Soleil. Un peu plus d'une année après l'opposition d'où nous sommes partis, le 12 mars 1870, Mars était arrivé en M″, la Terre en T″, en ligne droite avec le Soleil qui avait alors même longitude que Mars; en un mot, Mars se trouvant au delà du Soleil, était devenu invisible pour nous, parce que sa lumière se confondait dans ses rayons : ce fut l'époque de la *conjonction*. Peu à peu, Mars se dégageant du Soleil, s'en éloigna de plus en plus ; le 16 dé-

cembre de la même année 1870, la Terre étant arrivée en T''', Mars parvint lui-même en M''', à 90° du Soleil : nouvelle *quadrature*. Enfin, à partir de cette position, il a continué à s'éloigner du Soleil, jusqu'au point M_1, où il s'est trouvé de nouveau à l'opposé du Soleil par rapport à la Terre T_1, le 19 mars de l'année 1871. Ainsi, après un intervalle de temps d'un peu plus de deux années, les deux planètes se sont retrouvées, non pas aux mêmes points de leurs orbites, mais dans une même situation relativement au Soleil. La Terre a accompli dans ce temps un peu plus de deux de ses révolutions, Mars un peu plus d'une des siennes[1].

Le mouvement de Mars est célèbre dans les fastes de l'astro-

1. Sur les 779 jours dont se compose une révolution synodique moyenne de Mars (la durée de cette révolution est variable), il faut distinguer une période de 73 jours au milieu de laquelle a lieu l'opposition : pendant tout ce temps, le mouvement de la planète sur le ciel est rétrograde, c'est-à-dire qu'elle semble marcher d'Orient en Occident, avec une vitesse variable qui atteint son maximum le jour même de l'opposition. Au commencement et à la fin de cette période rétrograde, Mars paraît stationnaire. Enfin tout le reste de son mouvement apparent est direct, et la vitesse avec laquelle Mars se meut ainsi sur la voûte étoilée atteint son maximum le jour de la conjonction. Ces apparences, ces stations et rétrogradations se retrouvent dans le même ordre chez toutes les planètes supérieures, et elles s'expliquent de la façon la plus simple par les mouvements réels, simultanés, de chacune des planètes et de la Terre elle-même. C'est un effet de perspective qu'on peut rendre évident sans recourir à aucun appareil mécanique : il suffit d'imaginer deux observateurs tournant avec des vitesses inégales autour d'un point de leur plan représentant le Soleil et à des distances différentes. L'observateur le plus près du centre constatera de la façon la plus simple, par l'examen des positions que son compagnon occupera, soit relativement au centre du mouvement, soit relativement aux objets éloignés qui figurent la voûte du ciel, toutes les circonstances du mouvement synodique d'une planète supérieure : l'opposition, la conjonction, les stations et rétrogradations ; l'autre observateur, au contraire, sera témoin des phénomènes que caractérisent tous les mouvements apparents d'une planète intérieure, les oscillations ou digressions occidentales ou orientales, la portion rétrograde et la portion directe de chaque révolution synodique.

Nous avons cru devoir nous étendre sur ces questions de géométrie céleste, afin de n'avoir pas à y revenir, quand nous décrirons les autres planètes.

nomie. C'est en l'étudiant d'après ses propres observations et celles de son maître Tycho-Brahé, que Képler a découvert successivement les trois lois qui portent son nom, celles du mouvement elliptique des planètes autour du Soleil. Dans les oppositions, la parallaxe de Mars devient assez forte, pour qu'on puisse la mesurer et en déduire la parallaxe du Soleil, comme plusieurs astronomes l'ont fait dans ces derniers temps.

Pour effectuer une révolution entière autour du Soleil, il faut à la planète Mars 686^j98, c'est-à-dire 1 année sidérale terrestre et 321^j72 : son orbite est donc de 43 jours et demi moins longue que deux années de la Terre. L'orbite qu'elle décrit pendant cet intervalle de temps est une ellipse, dont le plan ne coïncide pas tout à fait avec celui de l'écliptique (l'angle d'inclinaison est de près de deux degrés, $1^{\circ}51'$). C'est, après l'orbite de Mercure, la plus allongée des orbites des huit planètes principales : son excentricité est égale à 0.09326. Il en résulte, pour ses distances au Soleil, des variations assez considérables et des différences qui atteignent leur maximum aux époques où Mars se trouve aux deux extrémités du grand axe de son orbite, c'est-à-dire à l'aphélie et au périhélie. Voici d'ailleurs quelles sont ces distances :

		En rayons moyens de l'orbite terrestre.	En millions de kilomètres.
Distances de Mars au Soleil	aphélie. . . .	1.6658	246.3
	moyenne. . .	1.5237	225.4
	périhélie . . .	1.3816	204.4

On voit qu'entre les distances extrêmes de Mars au Soleil, il y a une différence de 42 millions de kilomètres ou de 10 500 000 lieues, près de la cinquième partie de la distance moyenne. Le développement total de l'orbite mesure, en nombres ronds, 1400 millions de kilomètres, que la planète parcourt avec une vitesse variant de 22 à 26 kilomètres par seconde : en moyenne, Mars franchit par seconde $23^k.8$, ou plus de 2 millions de kilomètres par jour. Sa vitesse de

translation est donc à peu près les $\frac{8}{10}$ de la vitesse moyenne de la Terre.

Les distances de Mars à la Terre sont très-variables : c'est, comme nous l'avons dit déjà, une conséquence des positions relatives que les deux planètes occupent sur leurs orbites. A l'époque d'une conjonction supérieure, il faut faire la somme des rayons vecteurs ou des distances de la Terre et de Mars au Soleil pour obtenir leur distance mutuelle (à peu de chose près du moins), tandis qu'à l'époque d'une opposition, c'est au contraire leur différence. Ajoutons que les deux orbites, celle de Mars surtout, étant excentriques au Soleil, les distances minimum de Mars à la Terre varient entre d'assez grandes limites. En se reportant aux figures 30 et 87, on peut voir que si l'opposition a lieu vers le milieu d'août, les planètes seront le plus rapprochées possible l'une de l'autre ; si, au contraire, cette opposition a lieu dans les points opposés des orbites, vers le milieu de février, elles seront notablement plus éloignées. L'inverse a lieu pour les distances maximum, qui seront les plus grandes de toutes, quand la conjonction aura lieu en août, les moindres si elle a lieu en février[1]. En

1. Voici un tableau de quelques-unes des oppositions de Mars, qui montre clairement les variations considérables des distances où cette planète se trouve de la Terre, selon les situations des deux astres sur leurs orbites respectives :

Époques des oppositions.	Rayon vecteur de Mars.	Distances de Mars à la Terre.
19 sept. 1830.	1.3911	0.3895
5 février 1837.	1.6594	0.6746
17 août 1845.	1.3930	0.3820
17 juillet 1860.	1.4703	0.3910
6 octob. 1862.	1.4085	0.4094
13 février 1869.	1.6638	0.6772
5 sept. 1877.	1.3832	0.3772

La prochaine opposition de Mars, celle du 5 septembre 1877, sera favorable aux observations, parce que, comme en 1830, en 1845 ou en 1862, la planète se trouvera à une de ses distances minimum de la Terre : le 2 septembre, cette distance sera plus petite encore que le jour même de l'oppo-

résumé, on trouve que les distances de Mars à la Terre varient du simple au septuple : la plus petite possible est les $\frac{3}{8}$ seulement de la distance moyenne du Soleil à la Terre, c'est-à-dire égale à 55 millions de kilomètres, 14 millions de lieues ; la plus grande atteint près de trois fois la même distance moyenne. Mars est alors éloigné de la Terre d'environ 396 millions de kilomètres ou 99 millions de lieues.

§ 2. MARS A L'ŒIL NU ET AU TÉLESCOPE. — DIMENSIONS APPARENTES ET RÉELLES.

Mars apparaît à l'œil nu comme l'étoile la plus rouge du ciel : aussi les anciens l'avaient-ils surnommé πυρόεις, *incandescent*, *couleur de feu;* en sanscrit, angaraka, *charbon*

sition, ou 0.3767. La figure 136 donne les positions relatives des deux astres, deux mois avant et deux mois après l'époque de l'opposition même. Elle fait

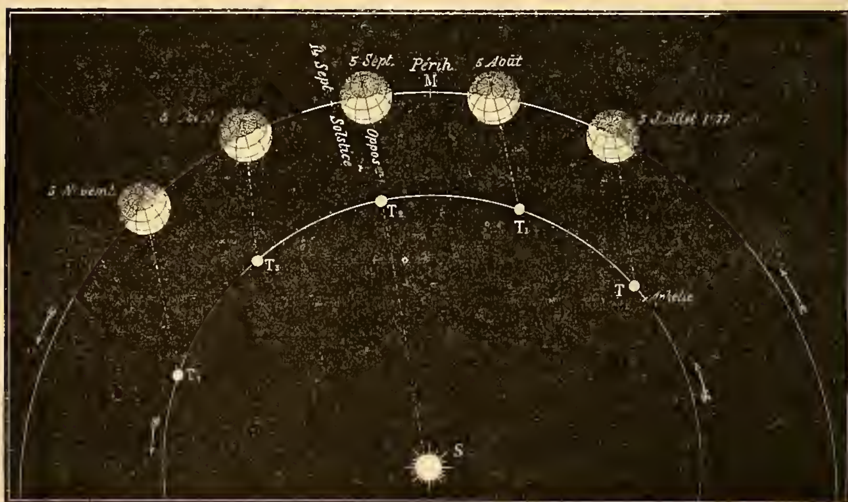


Fig. 136. Positions et distances relatives de Mars et de la Terre pendant l'opposition de 1877.

voir aussi comment le globe de Mars se trouvera placé et quelle portion de sa surface il tournera particulièrement vers la Terre.

ardent. Son éclat varie considérablement, en raison de la variabilité même de ses distances à la Terre : à l'époque de ses oppositions, Mars brille au ciel comme une belle étoile de première grandeur, dont la lumière est le plus souvent calme et se distingue ainsi des autres étoiles par l'absence de scintillation, caractère commun d'ailleurs à toutes les planètes, mais non absolue, puisque Vénus, Mercure et Mars lui-même ont parfois une lumière scintillante.

Vu au télescope, le point lumineux prend la forme d'un disque nettement terminé, dont la teinte rougeâtre ou rouge-jaune n'a fait que diminuer d'intensité sans disparaître : avec un grossissement suffisamment fort, on y remarque, principalement vers l'époque de l'opposition ou entre les deux quadratures qui en sont voisines, des taches dont nous donnerons plus loin la description. Bien que la planète emprunte sa lumière au Soleil, et dès lors n'ait jamais qu'un de ses hémisphères complétement éclairé, son disque paraît presque toujours circulaire : il n'a jamais de phases en forme de croissant comme Vénus et Mercure. On conçoit en effet que, l'orbite de Mars enveloppant l'orbite de la Terre, il ne peut jamais y avoir qu'une faible partie de l'hémisphère obscur tournée vers nous. C'est à l'époque des quadratures qu'a lieu la plus forte phase, d'un peu plus de 30° ; mais alors même le disque de la planète diffère assez peu d'un cercle, ayant l'apparence du disque lunaire trois jours environ avant ou après la pleine Lune : l'aspect de Mars en cette circonstance lui a fait donner par J. Herschel le surnom de *gibbeux* (voir la planche XXII). Si faible que soit cette phase, elle témoigne du fait que nous mentionnons plus haut, à savoir : que la lumière dont la planète brille n'est autre chose que la lumière du Soleil réfléchie vers la Terre.

A sa distance moyenne, Mars a un diamètre apparent[1] com-

1. 9″.57 d'après les mesures micrométriques faites en 1845 et 1847 à l'Ob-

pris entre 9″ et 10″. Mais ces dimensions varient énormément, puisque aux plus grandes distances de la Terre le diamètre de la planète se réduit à 3″.6, et qu'aux oppositions les plus favorables il s'élève à 25″.5, variant ainsi du simple au septuple. La figure 137 fait saisir d'un coup d'œil ces différences, que

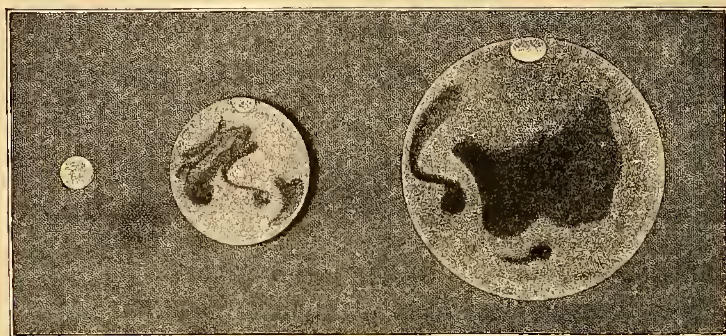


Fig. 137. Dimensions apparentes de Mars à ses distances extrêmes de la Terre et à sa distance moyenne.

nous avons vues plus haut se traduire par des variations dans l'éclat de la lumière de Mars.

Des dimensions apparentes passons aux dimensions réelles. Les voici, dans l'hypothèse du diamètre apparent égal à 9″.57 :

	La Terre = 1
Diamètre de Mars.	0.540
Surface —	0.292
Volume —	0.157

Évalué en kilomètres, le diamètre de Mars est 6890^{k}, ou 1700 lieues en nombres ronds, ce qui donne 21 500 kilomètres ou 5375 lieues pour la circonférence de son équateur. Il ne faudrait pas moins de 8 300 000 globes égaux à celui de Mars pour former le volume du Soleil. Enfin, ce même globe vaut 7 fois 3/4 celui de la Lune et près de 3 fois le globe de Mercure. Il paraît bien établi que Mars a une forme ellipsoïdale,

servatoire de Paris ; W. Herschel avait obtenu 9″.1 ; Schrœter en 1789, 9″.84 ; M. Liais a trouvé récemment 9″.9.

qu'il est aplati aux pôles de rotation ou renflé à son équateur. Mais la détermination de cet aplatissement offre des difficultés considérables que la plupart des observateurs attribuent aux erreurs de mesures provenant de l'irradiation due aux taches polaires, toujours très-brillantes. Arago, qui a fait avec un grand soin une série de mesures des deux diamètres, équatorial et polaire, en avait conclu que ce dernier est moins long que le premier de la trentième partie de sa valeur. Herschel, en 1784, évaluait la même quantité à $\frac{1}{16}$; Schrœter, à la même époque, la regardait comme au plus égale à $\frac{1}{80}$; les premières mesures d'Arago donnaient des nombres non moins diver-

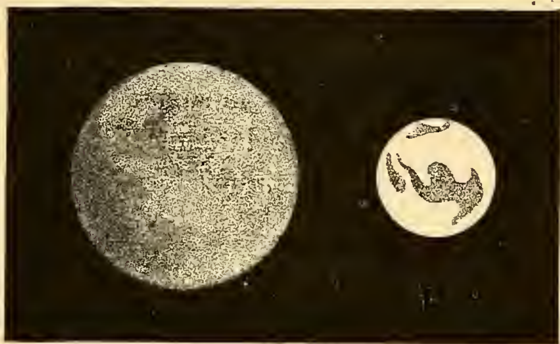


Fig. 138. Mars et la Terre; dimensions comparées.

gents; celles faites sous sa direction à l'Observatoire de Paris en 1845 et 1847 réduisaient l'aplatissement à $\frac{1}{33}$, et enfin des mesures plus récentes l'évaluent seulement au tiers de la valeur adoptée par Arago : M. Kaiser (de Leyde) donne $\frac{1}{118}$ pour l'aplatissement, tel qu'il a pu le mesurer pendant l'opposition de 1862. En supposant que la planète ait été primitivement fluide, la plupart des nombres qui précèdent sont trop considérables ; du moins ils paraissent en désaccord avec les lois de l'hydrostatique qui régissent la configuration des corps célestes. Mais peut-être ici l'incertitude des mesures est-elle la seule cause de cette apparente anomalie ; peut-être, espérons-le du moins, dans les oppositions prochaines les plus favorables,

les astronomes arriveront-ils sur ce point à des données plus précises.

La masse de Mars, calculée d'après les perturbations qu'elle fait éprouver au mouvement de translation de la Terre autour du Soleil, est environ la trois-millionième partie de la masse du Soleil, à peu près $\frac{1}{9}$ de la masse de notre globe (0.109) ; sa densité moyenne est 0.692[1], celle de la Terre étant prise pour unité. En rapportant cette densité au poids spécifique de l'eau, on trouve le nombre 3.76 environ, d'où l'on pourrait induire que la matière formant le globe de Mars se rapproche, sous le rapport de la densité, d'un grand nombre de nos minéraux terrestres, et aussi de quelques aérolithes ; mais il y a toujours, dans les comparaisons de ce genre, une réserve à faire, c'est qu'on ne connaît pas la loi de variation de la densité des couches du centre à la surface de la planète, de sorte qu'en définitive on ignore la densité des matériaux qui composent le sol lui-même. L'intensité de la pesanteur à la surface de Mars est 0.374 : un corps tombant librement dans le vide, sous l'influence de la seule gravité, y parcourt donc $1^m.833$ dans la première seconde de la chute, et sa vitesse acquise, après ce temps de chute, est égale à $3^m.666$.

§ 3. MOUVEMENT DE ROTATION. — JOURS ET NUITS. SAISONS ET CLIMATS.

Si l'on choisit, pour observer Mars au télescope, les époques les plus favorables — ce sont, comme on l'a vu, celles où la planète est en opposition, et par suite à sa plus grande proximité de la Terre — si, de plus, les conditions atmosphériques sont

1. Le tableau de la page 231 donne, d'après l'*Annuaire du bureau des Longitudes*, le nombre 0.714, qui est trop fort. Même remarque pour l'intensité de la pesanteur à la surface de Mars, que le même tableau donne plus forte que ne le comportent les autres éléments.

convenables, son disque apparaîtra, sous une forme circulaire et parfaitement limitée, parsemé de taches sombres et de taches brillantes, dont l'éclat et la couleur diffèrent sensiblement. Les parties brillantes, sauf en deux points presque diamétralement opposés; sont d'une teinte rougeâtre caractéristique, tandis que les taches sombres, probablement par un effet de contraste, semblent d'un bleu ou d'un gris verdâtre. Sur toute sa circonférence, le disque est plus lumineux que dans la partie centrale; aussi les taches sombres s'effacent-elles et

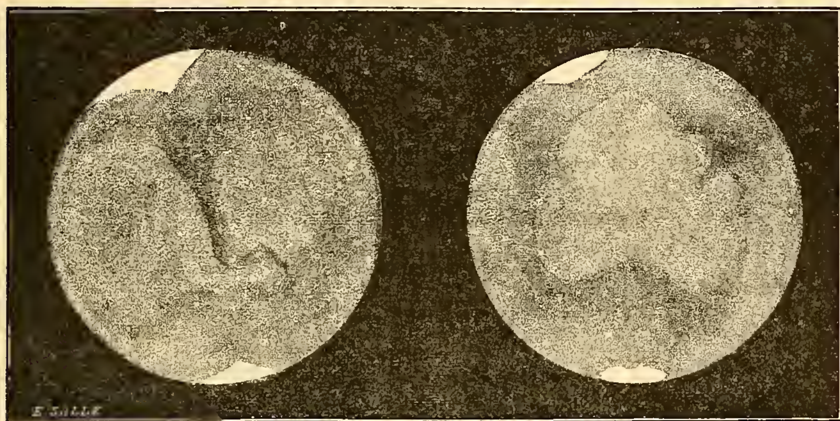


Fig. 139. Aspect de la planète Mars, le 20 avril 1856, d'après les dessins de Warren de la Rue.

disparaissent-elles sur les bords. Enfin, aux deux points dont j'ai parlé plus haut, et qui ne sont pas situés à l'extrémité d'un même diamètre, deux taches d'inégale étendue et d'une blancheur qui contraste avec les parties rougeâtres, brillent avec un éclat tout particulier[1]. Ces deux taches marquent à peu près les pôles de Mars.

Tous ces accidents de la surface de la planète sont en partie

1. « La couleur des taches polaires — ce sont Beer et Mædler qui parlent — toutes les fois qu'on put les apercevoir distinctement, fut toujours un blanc brillant et pur, en aucune façon semblable à la couleur des autres parties de la planète. En 1837, il arriva une fois que Mars fut pendant l'observation complétement obscurci par un nuage, *à l'exception de la tache polaire qui se montrait distinctement à la vue.* » (*Fragments sur les corps*

permanents, en partie variables. La permanence des taches, c'est-à-dire la constance de leurs contours principaux et de leurs situations relatives, a été constatée par de nombreuses et minutieuses observations, chose plus difficile qu'on ne le croirait au premier examen[1]. En effet, comme l'observation même des taches le prouve, la planète a un mouvement de rotation sur elle-même assez rapide, puisqu'il s'effectue en 24 heures et demie environ. Il suit de là, qu'en quelques heures l'aspect du disque change : c'est ce dont on peut s'assurer facilement en examinant les dessins des figures 139 et 140. La première montre le mouvement des taches de Mars, d'Occident en Orient, dans le court intervalle de 2 heures

célestes du système solaire.) Arago estimait que l'éclat des taches polaires est plus que double de celui des autres taches brillantes ou des bords du disque.

1. Tandis que Cassini reconnaissait sans difficulté, en 1670, les taches qu'il avait vues en 1666, Maraldi regardait comme impossible d'identifier les dessins de Mars faits dans les années 1704, 1717, 1719. De nos jours, des difficultés semblables se sont présentées, en comparant les dessins de Mars faits en 1830 et 1837 par Beer et Mædler avec ceux qui résultent des observations de 1858 faites à Rome par Secchi. Au contraire, M. N. Lockyer retrouve toutes les configurations principales des taches de Mars données par Beer et Mædler, dans celles que cet observateur a reconnues lui-même en 1862.

Il y a deux raisons principales qui expliquent la contradiction apparente de ces résultats. En premier lieu, on conçoit aisément l'altération qui résulte de la perspective pour des objets situés à la surface d'une sphère; le mouvement de rotation les fait voir tantôt de face, tantôt obliquement sur les bords du disque, et dans ce second cas, très-déformés. De plus, un effet semblable est la conséquence de l'inclinaison de l'axe de Mars, laquelle est, comme on sait, considérable; aux diverses oppositions, les pôles et les autres régions de Mars se présentent à la Terre sous des inclinaisons différentes, de sorte qu'aux déformations apparentes en longitude, s'en joignent d'autres en latitude. Cette première cause d'incertitude peut être aisément éliminée, et l'a été en effet, par une discussion géométrique des aspects des taches à diverses époques. Mais une seconde cause, toute physique, des différences en question, ne peut être de même écartée. C'est celle qui provient des changements réels survenus à la surface de Mars ou dans son atmosphère, changements qui altèrent réellement pour nous les contours des taches sombres ou brillantes de son disque. Nous en dirons plus loin quelques mots.

5 minutes ; la seconde, à des intervalles encore moindres, de 1 heure et demie et 1 heure.

Il paraît que les taches obscures de Mars ont été vues pour la première fois par Fontana en 1636 ; Bartoli en vit deux, huit ans plus tard ; et comme elles disparaissaient de temps à autre, cela fit soupçonner le mouvement de rotation, que Cassini I mit hors de doute en 1666, et dont il détermina le premier la durée : il trouva que le globe de Mars tourne sur lui-même, d'Occident en Orient, en $24^h 40^m$. Maraldi, W. Herschel, puis de nos jours Beer et Mædler, reprirent, d'après leurs propres observations, le calcul de cette durée ; et tout



Fig. 140. Rotation de Mars. Mouvement des taches, d'après les observations de Norman Lockyer, le 23 septembre 1862.

récemment M. R. A. Proctor, astronome anglais, combinant des observations d'Hooke en 1666, de Dawes en 1856 et 1864, et de Browning en 1867, observations qui s'étendent sur 201 années et ne comprennent pas moins de 71 538 rotations de Mars, a conclu pour la durée de l'une d'elles le nombre de 88 643 secondes ($24^h 37^m 22^s.735$) : ce résultat ne diffère d'ailleurs de celui de Beer et de Mædler que d'une seconde.

Telle est la durée du jour sidéral de Mars, plus long de 41 minutes 19 secondes qu'un jour sidéral terrestre. Pour en conclure la durée du jour solaire, il faut se rappeler que Mars achève une de ses révolutions autour du Soleil en $686^{jm}98$, que dès lors son année se compose de 669 rotations et 2/3, à peu

près ; et qu'ainsi cette même année, devant comprendre un jour solaire de moins, est formée de 668 $\frac{2}{3}$ jours solaires de la planète. L'un de ces jours a donc en moyenne une durée de $24^h 39^m 35^s$.

On voit qu'entre Mars et la Terre, la différence est peu sensible, sous le rapport du mouvement de rotation : les phénomènes qui en sont la conséquence, la succession des jours et des nuits, le lever et le coucher du Soleil et des étoiles, s'y montrent à peu près les mêmes, s'y succèdent, à peu de chose près, dans les mêmes intervalles de temps. Mais si la vitesse angulaire de rotation est à peu près la même, la vitesse linéaire est beaucoup moindre que sur notre globe[1] : en un mot, un point de l'équateur de Mars, au lieu de parcourir 465^m par seconde, n'en franchit guère plus de moitié : 244^m. La force centrifuge est donc proportionnellement moins forte, et dès lors son influence sur la diminution de l'intensité de la pesanteur aux diverses latitudes y doit être beaucoup moindre que sur la Terre ; c'est sur cette considération que s'appuient divers astronomes pour regarder l'aplatissement donné par les mesures micrométriques comme exagéré.

La position des pôles de Mars a été déterminée d'après le mouvement apparent des taches, et l'on en a conclu 62° 43'.5 pour l'inclinaison de l'axe de rotation[2] sur le plan de l'orbite.

1. Le rapport de ces vitesses est en raison directe des rayons des deux globes et inverse des durées de rotation ; pour une même latitude quelconque, un point de Mars a une vitesse linéaire de rotation un peu plus grande que la moitié (0.526) d'un point situé à la surface de la Terre.

2. D'après Oudemans. Sur Mars, l'obliquité de l'écliptique est donc égale à 27°16'.5. Le même astronome donne les éléments suivants de l'axe de rotation :

Longitude du pôle nord de Mars.	349° 1'
Latitude — —	61° 9'

Schrœter et W. Herschel ont donné des nombres peu différents.

Il résulte de là que les solstices de Mars sont peu éloignés du périhélie et de l'aphélie (voy. fig. 136). Dès lors, c'est pendant l'hiver de l'hémisphère nord

C'est là, comme on l'a vu en visitant les précédentes planètes, un élément fondamental du climat astronomique et sans doute météorologique, puisque celui-ci est, dans une grande mesure, une conséquence du premier. Avant toute observation préalable, on peut en conclure que le globe de Mars est partagé en zones glaciales, tempérées et torrides, ayant proportionnellement la même étendue que les zones de la Terre,

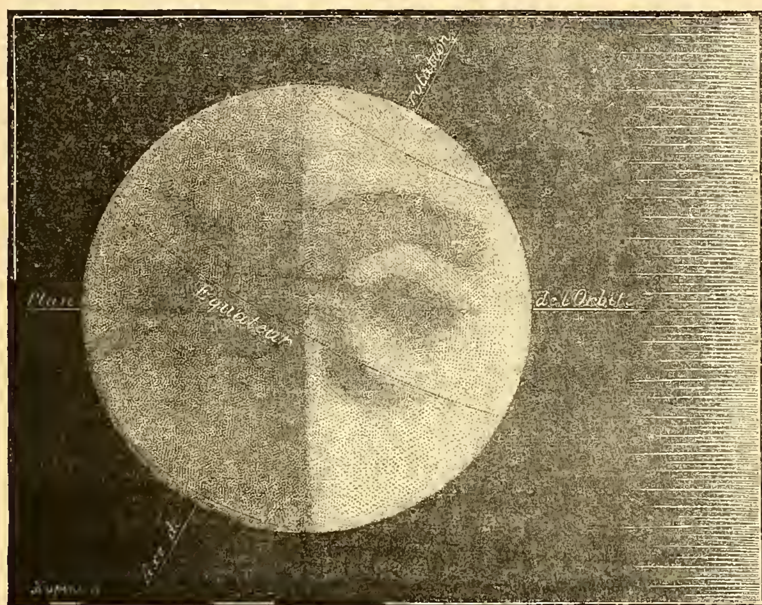


Fig. 141. Mars à l'un de ses solstices. Inclinaison de l'axe de rotation.

l'inclinaison de l'axe terrestre ne dépassant celle de l'axe de Mars que de 4° environ. Ainsi, les durées des jours et des nuits, leurs variations selon les latitudes, leurs variations en un même lieu dans le cours de l'année et des saisons, les longues nuits et les longs jours des régions polaires, en un mot tout ce qui regarde la distribution de la lumière et de la cha-

que le Soleil est dans sa plus grande proximité de Mars, en été qu'il est au contraire le plus éloigné. C'est une analogie de plus avec la Terre.

leur du Soleil, abstraction faite de leur intensité, sont autant de phénomènes presque semblables sur Mars et sur la Terre. Entre les deux planètes cependant, il y a une très-notable différence, c'est celle qui existe entre les durées des saisons. Sur Mars, elles sont beaucoup plus longues, et il y a entre leurs durées relatives des inégalités beaucoup plus considérables, double conséquence de la longueur de l'année de Mars, et de la grande excentricité de son orbite. Voici comment, pour l'hémisphère boréal de la planète, se partagent les 668 jours solaires de son année :

Le printemps dure.	191	jours moy. de Mars.
L'été —	181	—
L'automne —	149	—
Et enfin l'hiver	147	—

Ces nombres sont relatifs aux saisons de l'hémisphère boréal; mais comme les saisons estivales de cet hémisphère sont les saisons hivernales de l'hémisphère sud et réciproquement, il en résulte que le printemps et l'été réunis durent dans le premier 76 jours de plus que dans le second : le Soleil est donc bien plus longtemps au nord qu'au sud de l'équateur, et dès lors sa chaleur doit s'accumuler dans l'hémisphère boréal en quantité notablement plus grande que dans l'hémisphère austral. Mais, sur Mars comme sur la Terre, il y a une certaine compensation provenant de la différence des distances de la planète à son foyer de lumière et de chaleur. Ainsi, pour prendre un exemple, quand Mars est à sa moyenne distance du Soleil, l'intensité des radiations solaires qui tombent à sa surface est exprimée par le nombre 0.431, en prenant pour unité l'intensité relative à notre globe ; à l'aphélie, ce n'est plus que 0.360, tandis qu'au périhélie la même intensité s'élève à 0.524, augmentant ainsi de près de moitié de l'aphélie au périhélie. Tout compensé, l'hémisphère austral doit avoir des étés plus chauds et des hivers plus froids que l'hémisphère opposé, ainsi

qu'il arrive pour la Terre : seulement l'écart est plus considérable sur Mars; la différence des températures y est probablement plus sensible.

§ 4. CONSTITUTION PHYSIQUE ET MÉTÉOROLOGIE DE MARS.

L'étude de la surface de Mars, de ses taches sombres ou brillantes, des variations de forme et d'éclat de quelques-unes, de la permanence des autres, a fourni, comme nous l'avons fait pressentir plus haut, des indications d'un haut intérêt sur la constitution physique de cette planète, celle de toutes dont la surface est la mieux connue, et qui paraît se rapprocher le plus de la Terre. Entrons à ce sujet dans quelques détails.

On s'accorde à voir, dans les taches rougeâtres et brillantes de Mars, les parties solides du sol ou les continents, tandis que les taches sombres bleuâtres en forment les parties liquides ou les mers. Cette distinction est fondée sur l'inégale réflexion de la lumière par les terres et par les eaux; celles-ci, absorbant une notable portion des rayons lumineux, doivent réfléchir une lumière moins vive et paraître sombres à côté des terres. Selon M. Lockyer, si l'on admet que les taches obscures sont des mers, les taches les plus sombres sont celles que les terres environnent, sinon de tous côtés, du moins en grande partie.

D'où vient la coloration rougeâtre qui caractérise les parties brillantes du disque? Si Mars était lumineux par lui-même, on eût sans doute attribué cette teinte à la nature même de sa lumière; mais comme il ne fait que nous renvoyer la lumière blanche du Soleil, il est évident que la couleur est inhérente à la surface de la planète. On a fait à ce sujet plusieurs hypothèses. Les uns ont attribué la teinte rouge des continents à la nature du sol, composé de terrains ocreux, de grès rouges. D'autres (Lambert) ont prétendu que

la couleur de la végétation, au lieu d'être verte comme sur notre Terre, est rouge sur Mars : cette explication n'a rien d'invraisemblable ; mais, si elle est exacte, il doit y avoir dans l'intensité de la teinte, sur chacun des hémisphères de la planète, des variations correspondant aux saisons, de sorte que cette teinte diminue pendant l'hiver, pour renaître au printemps et atteindre en été son maximum. Nous ne connaissons

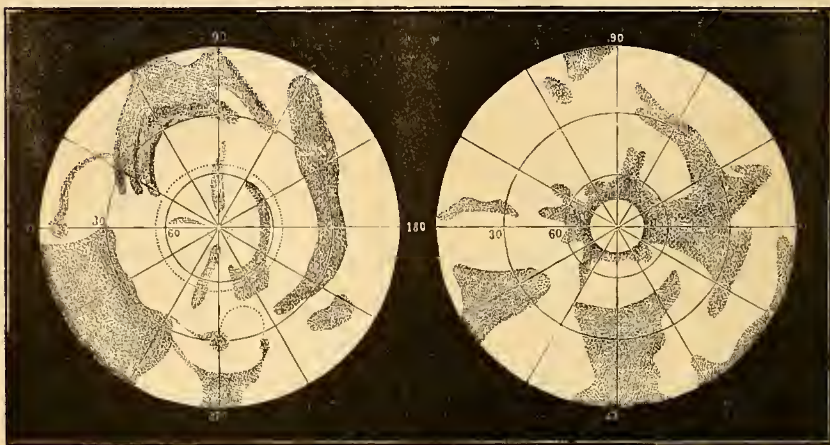


Fig. 142. Hémisphère ou mappemonde de Mars ; projection sur l'équateur, d'après Beer et Mædler.

pas d'observations qui confirment ni contredisent cette conséquence de l'hypothèse de Lambert.

Enfin, on a cru pouvoir expliquer la couleur des taches par la réfraction des rayons lumineux du Soleil à travers l'atmosphère de Mars. Arago a réfuté cette hypothèse par une remarque très-simple, à savoir : qu'aux bords de la planète la rougeur devrait être plus prononcée que dans les parties centrales, puisque les rayons lumineux traversent plus obliquement les régions des bords, et dans une plus grande profondeur. Or, c'est le contraire qu'on observe. Ajoutons qu'on ne voit pas pourquoi, dans cette hypothèse, la teinte rougeâtre ne serait pas générale ; comme le remarque fort bien M. Hug-

gins, la couleur rouge de Mars ne peut avoir son origine dans l'atmosphère, puisque les calottes polaires sont incolores, bien que la lumière qui nous les fait voir ait traversé des couches plus épaisses que la lumière des régions centrales. On ne peut donc assimiler, comme on l'a fait, la lumière rougeâtre de Mars aux lueurs de nos crépuscules.

Quoi qu'il en soit de ces incertitudes, que les progrès de la science dissiperont peut-être un jour, Mars est, après la Lune, le corps céleste dont nous connaissons le mieux la constitution

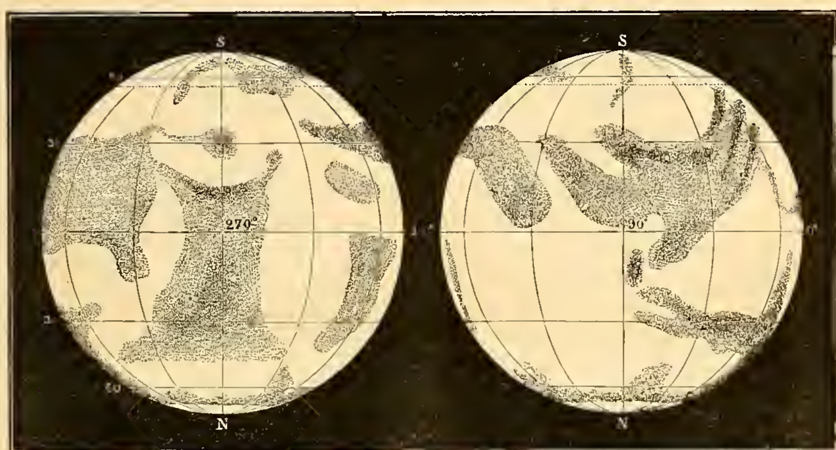


Fig. 143. Mappemonde de Mars, projetée sur un méridien, d'après les observations de Beer et Mædler.

physique, la géographie. Les travaux des deux astronomes que nous avons eu l'occasion de citer et que nous citerons encore, Beer et Mædler, nous permettent de donner ici (fig. 142 et 143) les hémisphères de Mars vus dans deux situations différentes, en face des pôles et en face de l'équateur.

Occupons-nous maintenant des taches polaires. Nous avons vu qu'elles se distinguent des autres par leur éclatante blancheur. Elles n'en diffèrent pas moins par leur variabilité. Mais, circonstance singulière, à mesure que la tache blanche de l'un des pôles diminue, l'autre s'accroît progressivement, de

sorte que le minimum de chacune correspond toujours à l'été, et son maximum à l'hiver de l'hémisphère où elle est située. C'est ainsi que, pendant l'opposition de 1830, on vit la tache blanche du pôle austral diminuer peu à peu, et ses limites se rétrécir, jusqu'à l'époque qui correspond, pour cet hémisphère de Mars, au milieu du mois de juillet de notre hémisphère boréal; à partir de ce moment, elle s'élargit de nouveau (Beer et Mædler). En 1837, on put observer des diminutions semblables dans les dimensions de la tache du pôle boréal. En même temps, les régions blanchâtres du pôle austral prenaient une extension considérable. Or, ces variations correspondaient également à la saison d'été de l'hémisphère nord, et à l'hiver de l'hémisphère sud de Mars.

Ainsi, de la Terre, nous assistons sans doute à la formation des glaces polaires, à la chute et à la fonte des neiges [1] sur le sol d'une planète voisine, en un mot à toutes les vicissitudes de chaud et de froid séparant les saisons de l'hiver et du printemps, de l'automne et de l'hiver. La succession de ces intempéries est aujourd'hui si bien établie, que les astronomes peuvent prédire approximativement la forme, la grandeur relative et la position des taches du pôle boréal et du pôle austral.

J'ai dit que les deux taches blanches n'offrent pas la même étendue, soit pendant leurs hivers, soit pendant leurs étés respectifs. La calotte neigeuse de l'hémisphère austral varie dans de plus grandes limites que celle du pôle opposé : beaucoup plus étendue pendant sa saison d'hiver, elle diminue pendant l'été de manière à n'être plus, en surface, que la cin-

1. « Si les taches polaires sont véritablement de la neige, leur diminution à l'approche de l'été ne peut avoir lieu que par la fonte et l'évaporation continuelles; l'épaisseur de cette neige est, d'après toute vraisemblance, très-considérable. Ces parties de la surface se disposant à s'évaporer, doivent par conséquent être extrêmement humides; or, un sol vaporeux et marécageux est certainement, de toutes les parties d'une surface, celle qui est le moins susceptible de réflexion et qui dès lors doit nous apparaître la plus foncée. » (*Beer et Mædler.*)



Praion, Lith. Imp. Fraillery.

MARS

Le 27 mai 1873, d'après Proctor.

quième partie de la tache neigeuse du pôle boréal. Cette différence s'explique aisément : par le fait de l'inclinaison de l'axe de la planète sur le plan de l'orbite, c'est le pôle austral qui se trouve tourné vers le Soleil, lorsque Mars est à une de ses plus petites distances du foyer de lumière et de chaleur. L'été n'arrive au contraire, pour le pôle boréal, qu'à l'époque d'une de ses plus grandes distances. A la vérité, ces différences de température se compensent en partie dans le cours d'une révolution; mais, comme nous l'avons déjà dit, les extrêmes de chaud et de froid n'en subsistent pas moins.

Ainsi donc, Mars offre avec la Terre les analogies les plus curieuses, et il est probable que les habitants de Vénus voient notre planète sous des apparences à peu près semblables à celles que Mars présente au foyer de nos instruments. Comme les pôles de Mars, les pôles de la Terre sont couverts de neiges et de glaces; c'est aussi notre pôle austral qui est le plus envahi, et pour les mêmes raisons astronomiques, par ces produits de la congélation de l'eau. Enfin les pôles de froid, sur Mars comme sur la Terre, ne coïncident pas exactement avec les pôles de rotation. Cette excentricité des pôles de froid est très-évidente dans les vues de Mars que nous donnons dans la figure 139 : les taches blanches et brillantes sont loin de se trouver aux extrémités d'un même diamètre de la planète.

S'il tombe de la neige sur Mars, c'est qu'il y a de l'eau vaporisée par la chaleur; dès lors, l'eau doit se répandre à la surface sous forme de nuages qui tombent, tantôt à l'état liquide sous forme de pluie, tantôt à l'état de cristallisation neigeuse. C'est ce que des observations récentes ont d'ailleurs rendu probable. En effet, la variabilité souvent très-rapide qu'on observe dans la forme des taches qui parsèment le disque, a suggéré l'opinion que ces phénomènes sont dus à l'interposition de masses nuageuses, en avant de ces taches. M. Norman Lockyer, qui a suivi avec soin la configuration des accidents de Mars pendant l'opposition de 1862, s'exprime

ainsi dans son intéressant Mémoire : « Bien que la permanence des taches caractéristiques de Mars ait été mise hors de doute, on observe de jour en jour, que dis-je, *d'heure en heure*, des changements de détail dans les nuances des diverses régions, sombres ou lumineuses, de la planète. Ces changements, je n'en puis douter, ont pour cause le passage des nuages en avant des différentes taches. » Les beaux dessins qui accompagnent le Mémoire paraissent justifier pleinement cette opinion. Les différences de forme que des taches, évidemment permanentes, ont offertes à divers observateurs dans les oppositions successives, ou même à chaque astronome dans le cours d'une série d'études télescopiques, viennent à l'appui de cette manière de voir.

L'analyse spectrale confirme aussi toutes ces probabilités de l'existence d'une atmosphère formée de gaz et de vapeurs. Dans le spectre de la lumière de Mars, en effet, le P. Secchi a vu des lignes semblables à celles de la vapeur d'eau de notre atmosphère. W. Huggins a observé une raie dont la position ne coïncidait avec aucune de celles du spectre solaire, d'où la conséquence qu'elle est due à l'absorption de la planète et probablement à l'atmosphère qui l'entoure; d'autres raies lui ont paru identiques à celle qu'on voit dans la lumière solaire quand elle a traversé les couches les plus basses de notre atmosphère ou des stratus peu élevés, et qui sont dues sans doute à l'absorption par les vapeurs ou les gaz dont ces couches sont formées. Ainsi, Mars possède certainement une atmosphère vaporeuse. Déjà nous avons dit que les bords plus lumineux du disque laissaient présumer l'éxistence d'une atmosphère qui efface par son éclat les taches sombres, au moment où la rotation les amène vers les bords [1].

1. M. Vogel, dans ses études de spectroscopie planétaire, a confirmé ces résultats. Voici un extrait qui concerne Mars : « Dans le spectre de Mars, dit-il, on retrouve un très-grand nombre de raies du spectre solaire. Dans les portions les moins réfrangibles du spectre, apparaissent quelques bandes

La météorologie de Mars est donc en grande partie connue. Elle présente, on le voit, les plus grandes analogies avec la météorologie de la Terre. Mais en même temps de notables différences les distinguent. Comme l'a remarqué un savant professeur, M. John Phillips, l'échange considérable d'humidité qui se fait périodiquement entre les deux hémisphères, surtout entre les deux pôles, doit donner lieu à des ouragans d'une impétuosité dont nous n'avons guère idée [1]. La fonte des neiges, sur des étendues aussi considérables, ne doit-elle pas produire aussi de terribles inondations périodiques?

§ 5. GÉOGRAPHIE DE MARS, OU ARÉOGRAPHIE.

Étant reconnu que Mars a des taches permanentes, il restait à résoudre un intéressant problème : déterminer la position précise des points principaux de ces taches, en les rapportant aux méridiens et aux parallèles de la planète, en un

qui n'appartiennent point au spectre solaire, mais qui coïncident avec celles du spectre d'absorption de notre atmosphère. On peut conclure avec certitude que Mars possède une atmosphère qui, pour la composition, ne diffère pas essentiellement de la nôtre, et doit être riche, en particulier, en vapeur d'eau. La coloration rouge de Mars semble résulter d'une absorption qui s'exerce généralement sur les rayons bleus et violets dans leur ensemble ; au moins, il n'a pas été possible de discerner, dans cette portion du spectre, des bandes d'absorption tranchées. »

1. Une observation singulière du P. Secchi, en 1862, a suggéré à ce savant l'idée que de tels ouragans pouvaient être vus de la Terre. Une tache sombre ovale lui parut, le 18 octobre, vers huit heures, entourée d'un anneau brillant, qu'enveloppait une autre bande obscure en forme de spirale. Un dessin fait le même soir par M. N. Lockyer, trente-six minutes seulement après l'observation de Rome, ne montre aucune trace de cette configuration bizarre. « Vi si vede una macchia scura di color diverso dal solito che no ho mai veduta, e pare circondata da un anelle o ciclone spirale.... La crederci una granda burrasca in marte. » Était-ce en effet une bourrasque, un cyclone de Mars? Nous renvoyons sur ce point au Mémoire de Secchi et à l'intéressante notice de M. F. Terby : *Note sur une configuration singulière des taches de la planète Mars.*

mot, chercher leurs longitudes et latitudes *aréographiques* (du grec ἄρης, *arès* ou Mars); limiter les contours des taches et en bien indiquer la forme, de façon à pouvoir reproduire une carte des océans, des mers, et par suite celle des terres et des continents.

Il semble que rien n'est plus simple que de donner la solution de la question ainsi posée. Mais, si l'on se rappelle ce que nous avons dit de la diversité d'aspects que présentent les taches de Mars, non-seulement dans les oppositions successives, à des observateurs munis des mêmes ressources d'observation, mais aussi, à la même époque, selon que les circonstances atmosphériques terrestres sont plus ou moins favorables, les instruments différents, ainsi que les jours et heures d'observation, on se rendra compte, tout au contraire, des difficultés que présente une telle solution. Le plus grand obstacle d'ailleurs vient peut-être des variations réelles que prend l'aspect d'une même tache selon les circonstances atmosphériques de la planète elle-même, le plus ou moins de transparence de son atmosphère, l'état serein ou nuageux de la région où la tache est située.

Plusieurs savants se sont voués à cette étude scabreuse. Des cartes ont été dressées, soit d'après les dessins d'un même observateur, soit d'après la comparaison et la discussion des nombreux dessins rassemblés depuis deux siècles; des globes ont été construits, excellent moyen de s'affranchir des déformations inévitables des meilleures cartes. Nous reproduisons ici quelques-uns de ces documents curieux. En premier lieu (fig. 142 et 143, p. 414 et 415), ce sont les hémisphères de Mars, tels que Beer et Mædler ont pu les dresser d'après leurs observations de 1830, 1832 et 1837.

La figure 144 représente une mappemonde de Mars, que nous avons dressée d'après les dessins de M. Proctor; ce savant a lui-même donné un planisphère de Mars, construit d'après une série d'observations de l'astronome anglais Dawes. Enfin,

la figure 145 est le *fac-simile* du planisphère de Mars, où l'on a tenté de figurer les positions et les formes des principales taches permanentes, d'après un grand nombre de dessins anciens ou nouveaux [1].

En comparant ces divers documents, on sera frappé des divergences que la position et la forme des taches y présentent. Mais il ne faut pas oublier que la carte des astronomes allemands a été dressée par un seul observateur et d'après ses

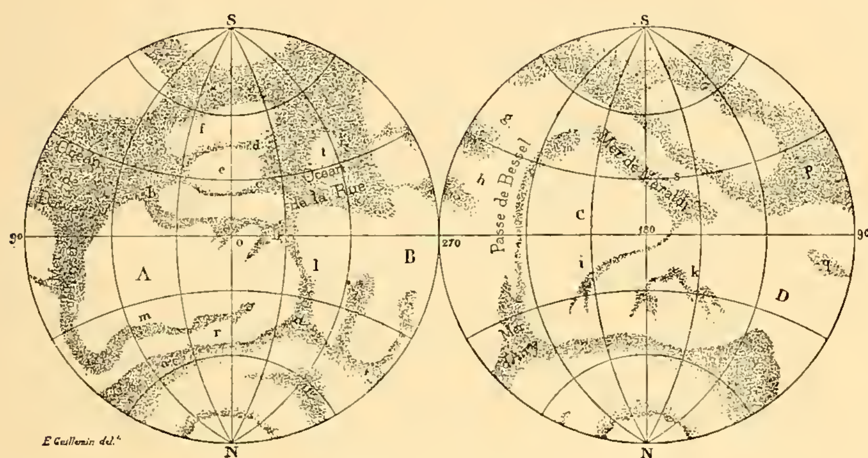


Fig. 144. Mappemonde de Mars, dressée d'après les dessins de M. Proctor.

observations propres, que celle de Proctor est aussi le résultat d'une étude comparative des dessins donnés par le même astronome : c'est la méthode qui, dans l'état encore incertain

1. Ce dessin nous a été obligeamment communiqué par notre compatriote, M. C. Flammarion, qui en est l'auteur. Un savant belge, M. le Dr F. Terby (de Louvain), a rassemblé depuis quelques années la plus précieuse collection de documents et de dessins sur la planète Mars, qui ait encore paru ; et il les a mis à la disposition des astronomes dans une série de Mémoires fort intéressants sur ce sujet. Citons les titres des deux plus importants : Aréographie ou *Étude comparative des observations faites sur l'aspect physique de la planète* Mars depuis *Fontana* (1636) *jusqu'à nos jours* (1873) ; Areographische Fragmente, *manuscrit et dessins originaux et inédits de l'astronome J. H. Schrœter, de Lilienthal.*

de la science sur ce point particulier d'astronomie, peut seule aboutir à un résultat sérieux. Or il faut avouer que la comparaison de cartes ainsi formées laisse encore bien des doutes sur l'étendue, la forme, et quelquefois même sur l'existence de mers, de détroits, d'îles, etc., auxquels on s'est un peu pressé de donner des noms. En nous arrêtant à la mappe-

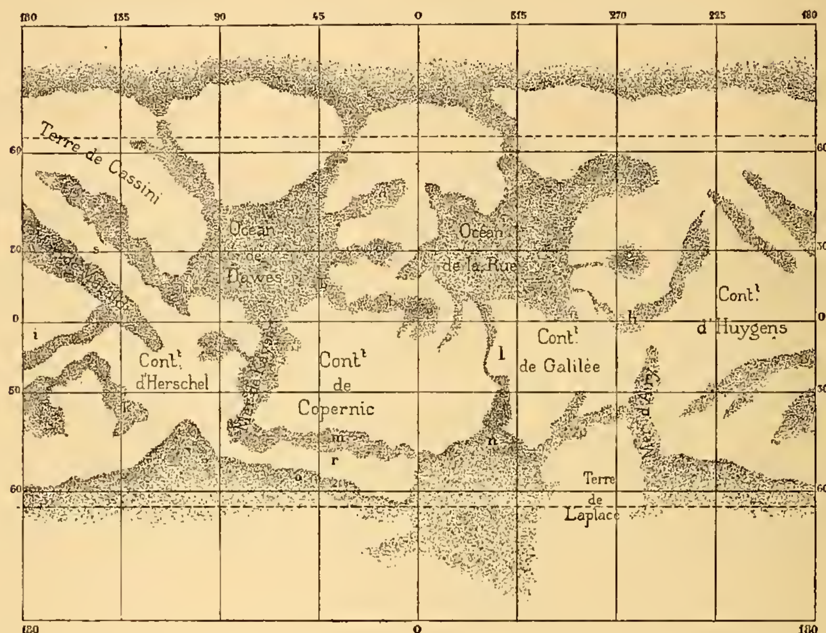


Fig. 145. Planisphère de Mars [1].

monde de Dawes, on voit qu'il n'y a, à proprement parler, sur Mars, qu'une seule masse continentale, dont la plus grande

1. Légende explicative des figures 144 et 145 :

A Contin.t Copernic	*e* île de Phillips	*n* mer de Tycho
B — Galilée	*f* — de Jacob	*o* — de Mædler
C — Huygens	*g* mer de Lokyer	*p* — de Hook
D — Herschel	*h* — de Dawes	*q* — de Main
a baie de Dawes	*i* passe d'Huggins	*r* terre de Mædler
bb détroit d'Herschel II	*k* mer d'Huygens	*s* — de Burckardt
c — d'Arago	*l* détroit de Dawes	*t* île de Dawes
d — de Newton	*m* passe de Nasmyth	*u* mer de Delambre

partie occupe les zones boréales, de l'équateur au 45e parallèle. Dans l'hémisphère austral, les terres continentales ne dépassent point le 30e degré et même ne l'atteignent pas, sur près des trois quarts de la périphérie ; en revanche, on y remarque plusieurs îles d'assez grandes dimensions.

Les régions continentales de Mars sont divisées en trois masses principales par trois bassins étroits dont l'un réunit complétement les mers glaciales des deux pôles. Enfin, plusieurs golfes allongés s'avancent, soit dans la direction des parallèles, soit dans celle des méridiens, et forment des mers intérieures analogues à notre mer Rouge ou à notre Méditerranée; d'autres taches isolées semblent des sortes de Caspiennes, sans communication avec les océans.

Comme on peut le voir dans nos dessins, on a donné des noms aux mers et à leurs golfes, aux détroits, aux terres et aux îles, en choisissant pour parrains de ces régions encore bien peu connues, les noms des astronomes qui ont étudié la configuration de Mars[1]. Il est probable que les observations et les discussions ultérieures changeront notablement les cartes aréographiques. Cela n'a rien d'étonnant : ce n'est que tous les deux ans que la planète peut être explorée, et cela à une distance qui se mesure par des dizaines de millions de lieues. On en est, pour Mars, à la période des tâtonnements[2], comme

1. C'est le système adopté pour la nomenclature lunaire. Cette manie d'inscrire des noms d'hommes dans les cieux, bien qu'innocente, nous semble un peu puérile.

2. Nous venons de mentionner très-succinctement la forme caractéristique de certaines mers allongées de Mars, « passes longues et étroites, mers *en goulots de bouteilles*, » selon l'expression de M. Proctor, qui met en opposition la configuration de ces canaux maritimes avec celle des mers terrestres. Un de nos jeunes et savants compatriotes, M. Stanislas Meunier, s'appuyant sur la description de l'astronome anglais, a cru pouvoir en conclure que Mars est à un état géologique plus nouveau, ou à un âge plus avancé que notre planète. « Il paraît évident, dit-il, que nos mers prendront sensiblement les mêmes contours que celles de Mars, lorsqu'elles auront suffisamment diminué de volume, à la suite de leur absorption progressive par

on l'était, il y a peu de temps encore, pour l'intérieur de l'Afrique, comme on l'est toujours aujourd'hui pour celui de l'Australie et pour les régions polaires terrestres.

le noyau solide. » Il prend pour exemple l'Atlantique et, d'après les sondages et les nivellements connus du fond de cet océan, il arrive à cette conclusion « que si l'on suppose l'eau de l'Atlantique absorbée par les masses profondes actuellement en voie de solidification, de façon que le niveau de cet océan s'abaisse de 4000 mètres, on aura à la fois une bien moins grande surface recouverte par l'eau et une forme étroite et allongée de la mer, c'est-à-dire exactement les conditions que présente Mars. » (*C. R. de l'Académie des sciences*, 1873, I.) Ce rapprochement ingénieux demanderait, à notre sens, pour être autre chose qu'une conjecture, qu'il fût prouvé que les continents émergés, sur la Terre comme sur Mars, ne doivent leur sortie des eaux qu'à l'absorption et à la disparition des masses liquides. Les phénomènes d'exhaussement et de dépression lents et continus n'ont-ils pas, au moins autant que la diminution des eaux, contribué à donner aux continents les formes que nous leur voyons? C'est une question de géologie comparée que notre savant confrère est plus compétent que nous à résoudre. L'idée qu'il a émise soulève d'ailleurs bien d'autres problèmes, tant astronomiques que géologiques.

VI

LES PETITES PLANÈTES

§ 1. DISTRIBUTION ET NOMBRE. — ÉLÉMENTS DES ORBITES.

Le nombre des planètes connues du système solaire n'était, il y a soixante-quinze ans, que de sept, parmi lesquelles on comptait la dernière grande planète découverte vingt ans auparavant par W. Herschel, Uranus. A l'heure où j'écris ces lignes (25 août 1876), ce nombre s'élève à 174, de sorte que, sans compter les comètes nouvelles et les satellites récemment observés, le monde solaire s'est enrichi de cent soixante-sept individus. Il est vrai qu'à l'exception de Neptune, qui fait partie du groupe des grosses planètes, tous ces corps sont d'une petitesse extrême, et, pris à part, n'égalent pas même en grosseur les satellites des planètes principales. Aussi les a-t-on nommés *astéroïdes*, *petites planètes* ou *planètes télescopiques*. Appelons-les simplement *petites planètes*. Cependant c'est un groupe des plus intéressants, et dont l'ensemble donne une physionomie nouvelle au monde solaire, en même temps qu'il jette un nouveau jour sur le problème de sa formation et de ses développements.

Les 166 petites planètes aujourd'hui connues — le nombre s'en accroît chaque année — sont toutes situées entre Mars et Jupiter; les orbites qu'elles décrivent autour du Soleil sont si voisines les unes des autres et tellement entrelacées, qu'un astronome contemporain, M. d'Arrest, y trouve la preuve évi-

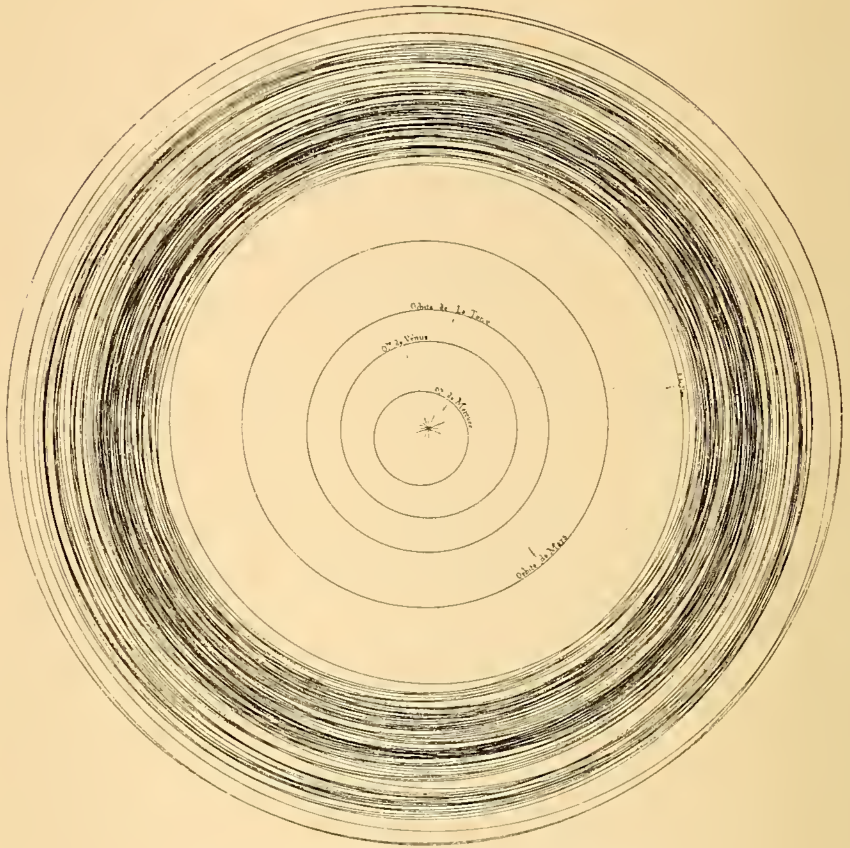


Fig. 146. Orbites des 108 premières petites planètes.

dente d'une commune origine : « Un fait, dit-il, semble surtout confirmer l'idée d'une liaison intime qui rattacherait entre elles toutes les petites planètes; c'est que, si l'on se figure leurs orbites sous la forme de cerceaux matériels, ces cerceaux se trouveront tellement enchevêtrés qu'on pourrait, au moyen de l'un d'entre eux pris au hasard, soulever tous les

autres [1]. » A l'époque où ces lignes étaient écrites, on ne connaissait encore que 14 petites planètes; depuis, parmi les nouvelles planètes découvertes, 138 sont venues se placer dans l'intervalle des deux extrêmes. La figure 146, qui représente les orbites des 108 premières, connues en 1869, suffit déjà à montrer le degré de cet enchevêtrement, bien plus complet aujourd'hui, que le nombre des courbes à figurer serait plus grand de 58. La comparaison de d'Arrest, et la conséquence qu'il en tire, acquièrent donc par cela même un nouveau degré d'évidence [2].

1. *Sur le système des petites planètes*, 1851, p. 30.

2. Depuis longtemps déjà les astronomes, en comparant les intervalles qui séparent du Soleil les planètes anciennement connues, avaient remarqué la distance relativement considérable des deux planètes Jupiter et Mars. L'imagination de Képler, qui jetait parfois l'illustre disciple de Tycho dans des vues théoriques un peu aventureuses, lui fit supposer l'existence d'une planète inconnue, et cette hypothèse parut corroborée par la découverte d'un astronome du dix-huitième siècle, de Titius, qui trouva entre les distances successives des planètes un rapport singulier, connu depuis sous le nom de *loi de Bode*. Voici en quoi consiste ce rapport.

Si l'on pose la suite des nombres :

0 3 6 12 24 48 96

et qu'on ajoute à chacun d'eux le même nombre 4, on aura la nouvelle série

4 7 10 16 28 52 100

Or, les termes de cette suite, à l'exception du cinquième, 28, représentaient à peu de chose près, à l'époque de Titius, les distances relatives des planètes alors connues :

Mercure, Vénus, la Terre, Mars, — Jupiter, Saturne.

Cette prétendue loi était formulée, lorsqu'en 1781 Uranus vint compléter la suite. Or il se trouva précisément que la distance de la planète nouvelle s'accordait avec le huitième terme, 196, de la série régulièrement formée. De là, à conclure à l'existence d'une planète qui devait combler la lacune existant entre Jupiter et Mars, il n'y avait qu'un pas. « Le baron de Zach, dit M. Lespiault dans son excellente monographie des astéroïdes (*Mémoires de la Société des sciences physiques et naturelles de Bordeaux*, tome II, p. 171), alla jusqu'à publier à l'avance, dans l'*Almanach de Berlin*, les éléments de la planète supposée, et il organisa une association d'astronomes pour la re-

Dans l'état actuel des découvertes, les 166 petites planètes forment une zone presque tout entière circonscrite dans celle des deux moitiés de l'intervalle compris entre Mars et Jupiter, qui est la plus voisine de Mars. Six seulement sur les 154 dont les éléments nous sont connus, Freia, Maximiliana, Camilla, Hermione, Hilda et Sylvia, les plus éloignées du Soleil par conséquent, se trouvent un peu plus rapprochées de Jupiter que de Mars.

La largeur moyenne de la zone est de près de 260 millions

cherche de cet astre. Le Zodiaque fut partagé en vingt-quatre zones, dont chacune fut confiée à la surveillance spéciale de l'un des membres de la société. La découverte ne se fit pas attendre, mais c'est d'autre part qu'elle vint. »

En effet, le 1er janvier 1801, à Palerme, Piazzi inaugura le dix-neuvième siècle par la découverte de Cérès, comblant ainsi la lacune signalée par la loi de Titius et de Bode, et dont, à vrai dire, il ne se préoccupait guère. Chose étonnante, Cérès vint précisément se ranger au-dessous du nombre vacant 28, qui exprime la distance de la nouvelle planète au Soleil, si l'on représente par 10 la distance de la Terre. Quinze mois après, une seconde planète, Pallas, venait s'ajouter à la première, ce qui commença à troubler fort les vues des prophètes de la première découverte.

Le savant astronome Olbers, qui venait de trouver Pallas, conçut alors une ingénieuse théorie. Il considéra les deux nouveaux astres comme les fragments d'une planète qui se serait jadis brisée en éclats. Or, les lois de la mécanique démontrent qu'après une explosion pareille, quelle qu'en soit d'ailleurs la cause, les débris lancés dans des directions quelconques doivent rester à une même distance moyenne du foyer de leurs mouvements, le Soleil, et revenir en outre, à chacune de leurs révolutions, passer par le point de l'espace où la catastrophe originaire a eu lieu *. Pallas et Cérès satisfaisaient suffisamment à ces conditions. Il en fut de même d'une troisième planète qui, sous le nom de Junon, vint montrer le troisième morceau de la planète hypothétique.

Les recherches continuèrent sous l'influence de ces vues, et enfin Olbers

* Un mémoire de Lagrange, inséré dans la *Connaissance des Temps* pour 1814, prouve qu'il suffirait « d'une force capable d'imprimer aux fragments de l'astre brisé une vitesse égale à 20 fois celle d'un boulet de 24, pour que chacun d'eux parcourût une nouvelle orbite elliptique autour du Soleil, l'intersection commune de tous les nouveaux plans étant le point même où l'explosion aurait eu lieu. »

En 1846, Mauvais déterminait les points de convergence des quatre premières planètes, et montrait que l'orbite d'Astrée, la cinquième, coupait les autres dans les mêmes régions.

A l'idée d'Olbers, on a substitué des vues bien différentes, mais qui impilquent également pour tous ces astres une commune origine.

de kilomètres, ou 65 millions de lieues[1]; mais dans cet intervalle même, les planètes sont très-irrégulièrement distribuées, puisque dès maintenant on en peut compter 124 situées dans la moitié de la zone située du côté de Mars, et 30 seulement dans l'autre moitié. Il résulte de ces nombres que les 124 petites planètes les plus rapprochées du Soleil ne sont séparées en moyenne les unes des autres que de 310 000 lieues, ou de 3 fois 1/3 environ la distance de la Lune à la Terre.

Flore et Hilda sont les noms des deux planètes extrêmes aujourd'hui connues : la première est à une distance moyenne du Soleil de 81 millions de lieues, la seconde à 130 millions, de sorte que le milieu de la zone est à 105 1/2 millions de

lui-même, en 1807, découvrit Vesta. Mais, contradiction bizarre, cette découverte qui semblait devoir consolider définitivement une théorie ingénieuse, et d'ailleurs rationnelle, en vint au contraire ébranler les fondements. La distance et les autres éléments de l'orbite de Vesta offraient des divergences sérieuses avec cette théorie et avec la loi de Bode, qui plus tard reçurent l'une et l'autre leur coup de grâce. Depuis 1845, en effet, époque de la découverte de la cinquième petite planète, le nombre de ces corps s'accrut rapidement, et tout fait présumer qu'il s'accroîtra beaucoup encore. La différence de leurs distances moyennes au Soleil et des autres éléments de leurs orbites apparut telle, que l'hypothèse d'Olbers dut être complétement abandonnée.

La planète Neptune, la dernière des planètes connues du système solaire dans l'ordre de la distance, est loin aussi de satisfaire à la formule empirique de Titius. Sa distance, qui serait représentée par le nombre 388, n'est en réalité que 300. Ajoutons, après bien d'autres, que le premier nombre de la série, celui qui correspond à Mercure, n'est pas formé d'une manière régulière. Au lieu de 0, il faudrait 1.5; en ajoutant 4, on trouverait 5.5, tandis que la vraie distance de Mercure est 3.87. Il peut être bon toutefois de retenir, à titre de règle mnémonique, le mode de formation de la série de Titius, d'ailleurs intimement liée à l'histoire des découvertes astronomiques, mais à la condition de considérer cette série comme purement empirique.

1. Cette largeur approche de 80 millions de lieues, quand, au lieu de prendre les distances moyennes, on considère les distances extrêmes. La distance périhélie de Flore est en effet de 280 millions de kilomètres; la distance moyenne de Hilda est de 590 millions : différence 310 millions de kilomètres ou 77 millions de lieues; la largeur de la zone dépasse donc la distance totale aphélie de la planète Mars au Soleil. Mais, comme pour tous les autres calculs semblables, il ne peut être question ici que des petites planètes actuellement connues.

lieues de l'astre central. La distance de la Terre au Soleil étant représentée par 10, le nombre que nous venons d'écrire le serait par 28.5. On retrouve là, à peu de chose près, le terme de la série de Bode qui correspondait d'abord à une lacune; mais l'inégalité de distribution des petites planètes n'ôte-t-elle pas toute valeur à cette coïncidence?

On vient de voir combien les orbites de tous ces petits astres sont, en moyenne, rapprochées les unes des autres. En les comparant une à une sous ce rapport, on trouve des distances encore plus petites. Les orbites d'Égérie et d'Astrée présentent un intervalle moyen de 20 000 lieues; celles d'Euphrosine et d'Hygie de 3300 lieues; enfin, entre les points les plus rapprochés des orbites de Junon et de Clotho, il n'y a pas plus de 1040 kilomètres, 260 lieues. Mais il faut bien comprendre que ces nombres ne s'appliquent pas aux deux astres eux-mêmes: d'abord parce que, à une époque donnée, ils se trouvent dans des directions bien différentes; ensuite parce que leurs orbites sont plus ou moins allongées, et que les plans dans lesquels ils se meuvent sont très-diversement inclinés[1].

1. Les passages simultanés de deux petites planètes par des points très-voisins, ou, en langage scientifique, leurs *conjonctions physiques*, sont des phénomènes dont la probabilité a été l'objet d'études intéressantes dues à M. de Littrow. Cet astronome a reconnu que les 42 premières petites planètes connues donneraient lieu à 18 conjonctions physiques dans la période de dix années comprises entre 1858 et 1867. M. Lespiault, en citant le travail de M. de Littrow, fait observer avec raison que ces rapprochements seront d'autant plus nombreux qu'on connaîtra un plus grand nombre de ces astres en miniature. Il signale notamment la similitude des éléments des planètes Fidès et Maïa et il ajoute : « Si l'on néglige l'inclinaison mutuelle des deux orbites, qui n'est que de 2′, on peut tracer ces deux orbites sur le même plan, et l'on trouve ainsi deux points d'intersection dont l'un coïncide presque avec le périhélie de Maïa. La distance entre les deux courbes ne s'élève, en aucun point, au-dessus du 20e du rayon de l'orbite terrestre. A l'époque actuelle, les longitudes moyennes des deux planètes diffèrent d'environ 40°; mais cette différence diminue constamment, quoique avec lenteur. Lorsqu'elle aura disparu, les deux planètes, malgré leur faible masse et en raison de leur continuel voisinage, exerceront l'une sur l'autre une action peut-être

Les formes des orbites sont loin d'être circulaires. La moins allongée de toutes, celle de Freia, l'est proportionnellement beaucoup plus que les orbites de la Terre, de Neptune et de Vénus, qui sont, il est vrai, les plus voisines du cercle, parmi les courbes décrites par les corps de notre monde solaire. La plus allongée est l'orbite de Polymnie, dont le grand diamètre

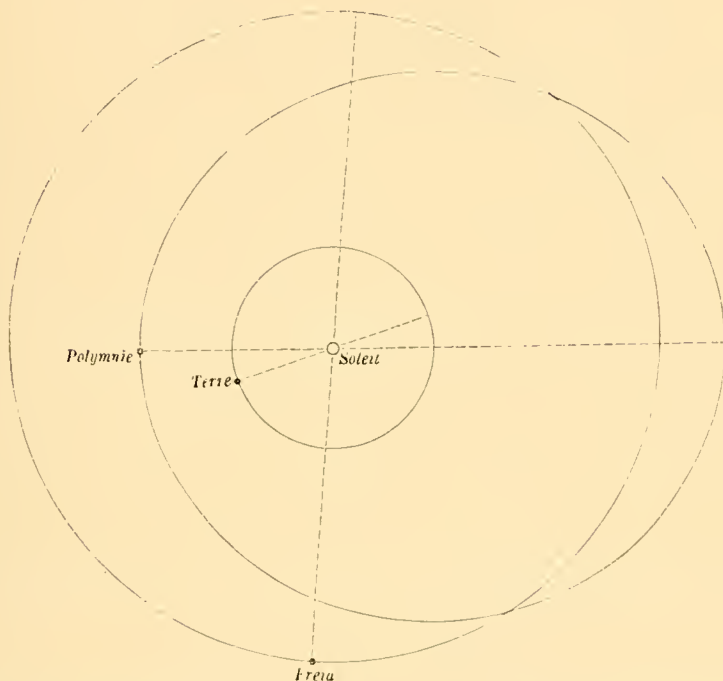


Fig. 147. Orbites des planètes Freia et Polymnie ; comparaison de leurs excentricités avec celle de l'orbite terrestre.

surpasse le plus petit du tiers de sa valeur totale, ce qui donne entre sa plus grande et sa plus petite distance au Soleil une différence de 72 000 000 de lieues. La figure 147 représente

assez considérable pour se réunir en un seul corps, ou pour tourner, comme les composantes d'une étoile double, autour de leur centre commun de gravité. » (*Note sur les petites planètes situées entre Mars et Jupiter.*) Il faut rapprocher de ces considérations ce que nous disons plus loin des deux planètes Junon et Clotho.

la forme et la grandeur relative de ces deux orbites, comparées à l'orbite de la Terre[1].

Les plans dans lesquels se meuvent les petites planètes sont très-diversement inclinés les uns sur les autres. En comparant leurs positions avec le plan de l'orbite de la Terre, on trouve que certains d'entre eux, ceux de Massalia (20), de Thémis (24), de Gerda (135), de Protogenia (147) et d'Angelina (64) par exemple, coïncident à fort peu de chose près avec ce dernier plan, tandis que l'orbite de Pallas s'élève angulairement à 34° 42′, c'est-à-dire à près des deux cinquièmes de l'angle droit[2]; les inclinaisons de la planète (148), d'Euphrosine (31), d'Æthra (132), de Niobé (71), d'Arthémise (105) et de Phocéa sont respectivement de 26° 1/2, de 25°, de 23° et de 21° 1/2 environ.

Il reste, pour terminer ces généralités sur les petites planètes, à dire un mot des durées de leurs révolutions autour du Soleil. Ces durées sont comprises entre 1193 et 2868 jours solaires moyens, c'est-à-dire entre 3 ans et 97 jours, et 7 ans et 31 jours, qui marquent la longueur des années de Flore et de Hilda. Il arrive, comme pour les distances moyennes, que certaines petites planètes consécutives font leurs révolutions en des temps presque égaux. Les périodes de révolution d'Euphrosine et d'Hygie n'ont que 2 jours et 11 heures de différence. Pour Égérie et Astrée, la différence n'est pas de deux jours (1j 8); pour Iris et Métis, elle n'est guère plus d'un tiers de jour; pour Junon et Clotho, d'un quart de jour.

1. Ce que nous disons ici des excentricités des orbites se rapporte aux petites planètes connues à l'époque où parut la première édition du Ciel. Aujourd'hui, Libératrix (125) est celle dont l'excentricité (0.346754) est la plus considérable; et c'est Lomia (117) qui, d'après les éléments calculés, a l'excentricité la plus faible, égale à 0.022884, qui surpasse d'un tiers seulement l'excentricité de l'orbite de la Terre, mais neuf fois moindre environ que celle de Mercure.

2. Ces inclinaisons considérables ont aussi fait nommer les astéroïdes planètes *ultra-zodiacales;* un grand nombre d'entre elles se trouvent sortir en effet, par le fait de cette inclinaison et de leur mouvement propre, de la zone où se meuvent les planètes principales.

Pour les deux planètes, Fidès et Maïa, dont il est question plus haut, les périodes et les autres éléments ont beaucoup de ressemblance : ainsi leurs plans sont inclinés l'un sur l'autre de moins de 3° ; leurs excentricités sont égales à peu de chose près ; leurs périhélies et leurs nœuds ascendants ne diffèrent que de 10 à 11 degrés. Ce sont, pour ainsi dire, deux *planètes jumelles*.

Passons maintenant en revue quelques-unes des principales petites planètes, et voyons si l'on est parvenu à obtenir quelques données sur leurs dimensions et leurs constitutions physiques.

§ 2. VESTA, JUNON, CÉRÈS ET PALLAS.

Vesta est la plus brillante du groupe entier. Elle est visible à l'œil nu par un ciel bien pur, à l'époque de ses oppositions, et sa lumière d'un jaune pâle est cependant plus blanche que celles des trois planètes découvertes avant elle. Elle met trois ans et huit mois (1325j6) à accomplir sa révolution entière autour du Soleil, à une distance moyenne de 87 millions 250 mille lieues. Comme son orbite est relativement assez peu allongée (l'excentricité est 0.088), il n'y a guère entre ses distances extrêmes qu'une différence de 8 000 000 de lieues de 4 kilomètres. Son diamètre réel, mesuré par Mædler, est de 100 lieues environ : ce n'est pas la trente-deuxième partie du diamètre de la Terre, de sorte que la surface de notre globe comprend plus de mille fois celle de Vesta. Voilà donc une planète, dont la superficie entière n'est guère que la neuvième partie du continent européen. Enfin le volume de la Terre est à peu près 31 000 fois celui de Vesta.

Junon offre l'aspect d'une étoile de huitième grandeur : c'est dire qu'elle est invisible à l'œil nu. Sa couleur est rougeâtre et l'éclat de sa lumière subit des variations, dont l'in-

tensité n'est pas moins remarquable que sa rapidité. Ce phénomène n'est pas particulier à Junon : on l'observe dans Vesta, qui devient parfois très-éclatante, dans Cérès et dans plusieurs autres petites planètes. Comment expliquer ce phénomène? On a fait, à ce sujet, diverses hypothèses. Les uns supposent que les diverses faces de ces petits corps ne réfléchissent pas la lumière solaire avec la même intensité, que quelques-unes sont formées de facettes cristallines, ou encore possèdent une lumière qui leur est propre. D'autres, comme M. de Littrow, croient que les petites planètes sont des corps très-peu réguliers, nous présentant par conséquent tantôt des faces très-étendues, tantôt des faces plus étroites : c'était aussi l'opinion d'Olbers, qui, regardant les premières petites planètes connues comme des fragments d'une planète unique, brisée et réduite en pièces, devait trouver très-naturelle l'irrégularité de forme de ces fragments. Qu'on admette l'une ou l'autre de ces hypothèses, elles reposent toutes sur un fait commun, celui d'une rotation réelle. Peut-être en étudiant avec soin les périodes de ces variations, parviendra-t-on à déterminer les durées des mouvements rotatoires. L'un des observateurs contemporains qui se sont le plus distingués par le grand nombre de petites planètes qu'ils ont découvertes, M. Goldschmidt, avait commencé, quelques années avant sa mort, ces intéressantes recherches.

Junon s'éloigne du Soleil, à son aphélie, de près de 111 millions de lieues, à son périhélie de 86 millions et demi ; sa distance moyenne est dès lors de 98 millions 750 mille lieues, et il existe une différence de 25 millions de lieues entre ses distances extrêmes à l'astre central. Son orbite est, comme on voit, très-différente du cercle ; l'excentricité 0.258 est d'un quart plus grande que celle de Mercure. Junon achève sa révolution sidérale en 1592 jours, ou en 4 années terrestres et 4 mois.

D'après Mædler, son diamètre mesure environ 140 lieues ; il

est ainsi 23 fois moindre que celui de la Terre. Sa surface est près du double de celle de Vesta, et son volume est la 12000e partie de celui du globe terrestre.

La 92e des petites planètes dans l'ordre des distances, et, on l'a vu, la première dans l'ordre des découvertes, *Cérès*, paraît comme une étoile rougeâtre dont l'éclat est intermédiaire entre ceux de Junon et de Vesta.

Un illustre observateur, Schrœter, avait cru trouver dans l'apparence vaporeuse de son disque la preuve de l'existence d'une atmosphère très étendue. Le même fait semblait se présenter pour Pallas, et il en concluait que chacune de ces deux planètes est entourée d'une enveloppe gazeuse de 200 lieues d'épaisseur. Depuis, on a reconnu qu'il y avait là un effet d'irradiation ou de diffusion dû à l'imperfection de son télescope [1].

Cérès tourne en 1681 jours 4 (4 ans 7 mois environ) autour du Soleil, dont elle est à une moyenne distance de 102 millions 250 mille lieues. Au périhélie, elle est plus rapprochée de 15 millions de lieues qu'à l'aphélie.

Le diamètre de Cérès a été mesuré plusieurs fois. Mais les résultats ne s'accordent guère ; tandis qu'il est de 185 lieues, suivant Schrœter, de 65 lieues seulement d'après W. Herschel, Argelander l'évalue à 90 lieues. En adoptant cette dernière évaluation, et en la réduisant d'après la nouvelle parallaxe solaire, on trouve que la surface de Cérès est un peu supérieure à la 1300e partie de celle du globe terrestre, de sorte qu'il faudrait environ 45000 volumes égaux au sien pour former le volume de la Terre.

Arrivons à *Pallas*, qui tourne en 1685 jours et un tiers au-

1. L'analyse spectrale n'a encore été appliquée qu'aux planètes Vesta et Flore, du moins à notre connaissance. Les recherches faites par M. Vogel sur les lumières de ces deux petites planètes, bien qu'il les estime un peu incertaines à cause du faible éclat du spectre, paraissent indiquer pour Vesta l'existence d'une atmosphère.

tour du Soleil, dans une orbite presque aussi allongée que celle de Junon (0.238), très-inclinée sur le plan de l'écliptique (près de 35°), et à une distance moyenne du Soleil de 102 millions 500 mille lieues : les distances moyennes de Cérès et de Pallas ne diffèrent ainsi que de 111 000 lieues. A son aphélie, Pallas s'éloigne du Soleil jusqu'à 125 millions de lieues, tandis qu'à son périhélie, elle en est à peine à 90 millions.

Vue à l'époque de sa moyenne distance à la Terre, Pallas a l'aspect d'une étoile de 7e à 8e grandeur, d'une belle couleur jaune. Son diamètre est évalué à 246 lieues (Lamont). Si cette mesure est exacte, Pallas est la plus considérable de toutes les petites planètes, bien que son diamètre soit encore 12 fois moindre que celui de la Terre, sa surface 136 fois moindre et son volume 1600 fois plus petit que le volume du sphéroïde terrestre. Tous ces nombres sont encore très-incertains, la mesure des diamètres de corps aussi petits étant fort difficile. Il ne faut les retenir qu'afin d'avoir une idée approchée des dimensions relatives des plus grosses planètes de ce groupe.

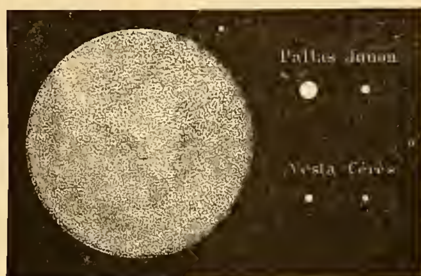


Fig. 148. Dimensions comparées de la Terre et des planètes Pallas, Junon, Vesta et Cérès.

Junon, Cérès, Pallas et Vesta sont en effet regardées comme les plus considérables des petites planètes, sans qu'on puisse dire cependant s'il n'y en a pas de plus volumineuses parmi les autres. La petitesse de toutes celles qu'on connaît est telle, et leurs distances si considérables, qu'on n'a pu mesurer directement leurs diamètres ; elles apparaissent dans les lunettes comme des points lumineux sans diamètre sensible[1].

1. L'éclat apparent des corps qui, comme les petites planètes, brillent de la lumière solaire réfléchie, dépend à la fois du diamètre réel, de la distance

Peut-être les moins gros de ces astres microscopiques ont-ils à peine quelques lieues de rayon, et leur étendue superficielle est-elle inférieure à celle d'un de nos plus petits départements. M. Lespiault, à qui j'emprunte cette comparaison, ajoute qu'un bon marcheur ferait aisément dans sa journée le tour de quelques-uns de ces globes en miniature.

§ 3. LA RECHERCHE DES PETITES PLANÈTES.

Pendant combien d'années encore trouvera-t-on des petites planètes faisant partie de l'anneau, et circulant entre Jupiter et Mars? C'est une question à laquelle il est difficile de répondre. Il est probable qu'on connaît aujourd'hui, je ne dirai pas les plus gros de ces corps, mais ceux que leurs distances à la Terre rendent le plus aisément visibles. La découverte des autres devient donc de plus en plus difficile, et l'accroisse-

au Soleil et à la Terre, et aussi du pouvoir réflecteur de la surface. Ce dernier élément n'est point connu pour les petites planètes; mais dans l'hypothèse où il serait égal à celui des grandes planètes, on a pu calculer, d'après une formule donnée par Argelander, les dimensions probables de ces petits astres. Voici, parmi 50 diamètres ainsi calculés, les résultats obtenus pour les douze plus grands et pour quelques-uns des plus petits :

	Diam. en kilom.		Diam. en kilom.		Diam. en kilom.
Vesta.	420	Hygie.	180	Isis.	40
Cérès.	356	Junon.	168	Circé.	36
Psyché.	344	Harmonie. . .	160	Leucothée . . .	36
Pallas.	244	Hébé.	156	Virginie	32
Lœtitia . . .	196	Iris.	156	Atalante	32
Eunomia. . . .	184	Amphitrite . .	132	Hestia	24

Les diamètres calculés pour Vesta et Cérès s'accordent bien avec les diamètres mesurés; mais la différence est considérable pour Junon et surtout pour Pallas. Les six plus petites de ces planètes, en les supposant sphériques, n'auraient pas plus de 75 à 125 kilomètres de tour. Enfin, d'après M. Lespiault à qui nous empruntons ces résultats, les volumes réunis des cinquante petites planètes en question ne dépasseraient pas la 200[e] partie de celui de la Lune, à peu près la 10 000[e] partie de la Terre.

ment de leur nombre est en partie subordonné au perfectionnement des instruments d'optique et des cartes célestes[1].

On entend si souvent, depuis une trentaine d'années, parler des découvertes de planètes nouvelles, qu'on sera peut-être curieux de connaître les méthodes employées pour cette recherche ; ce n'est point en effet le hasard qui préside à ces travaux. Depuis la découverte de Piazzi jusqu'à notre époque, c'est grâce à des recherches spéciales et systématiques qu'on est parvenu à enrichir de la sorte le monde solaire. Voici comment :

Ce n'est pas, je l'ai déjà dit, par son aspect physique qu'une planète se distingue, sur la voûte étoilée, de la multitude des points lumineux qui l'environnent, surtout lorsqu'il s'agit d'astres très-petits, d'un diamètre insensible. C'est par son mouvement propre, par son déplacement progressif qu'on parvient à la reconnaître. Pour cela, que faut-il ? Des cartes célestes très-minutieuses, donnant les très-petites étoiles, et dont une révision incessante permette de constater l'apparition d'étoiles nouvelles. Tel est le premier instrument de travail, indispensable pour une telle recherche. L'astronome qui entreprend la confection des cartes célestes exécutées avec ce détail et cette précision, est donc le collaborateur forcé de celui qui découvre les planètes. Ajoutons que souvent ces deux collaborateurs ne font qu'un. A la vérité, il n'est pas nécessaire d'explorer le ciel entier. Il suffit d'examiner les régions voisines de l'écliptique, parce que l'orbite d'une planète venant nécessairement couper deux fois par révolution la trace

1. D'après M. Le Verrier, il est possible de déduire de la théorie des planètes Mars et Mercure une limite supérieure de la masse totale des petites planètes, tant de celles qui sont connues que des autres ; cette masse totale serait égale, au plus, au tiers de la masse de la Terre. En supposant leur densité égale en moyenne à celle de notre globe, les cinquante plus grosses formeraient la 10 000e partie de la masse de la Terre. Donc ces petits astres peuvent être trois cents fois aussi nombreux que les cinquante dont nous parlons : il faudrait ainsi les compter par dizaines de mille.

même de l'orbite de la Terre, il suffit d'observer l'astre à l'un ou à l'autre de ces passages.

La figure 149 reproduit, à une échelle réduite, l'une des cartes construites par un observateur distingué, J. Chacornac, à qui l'astronomie doit, outre de nombreuses observations de divers genres, la découverte de 8 petites planètes.

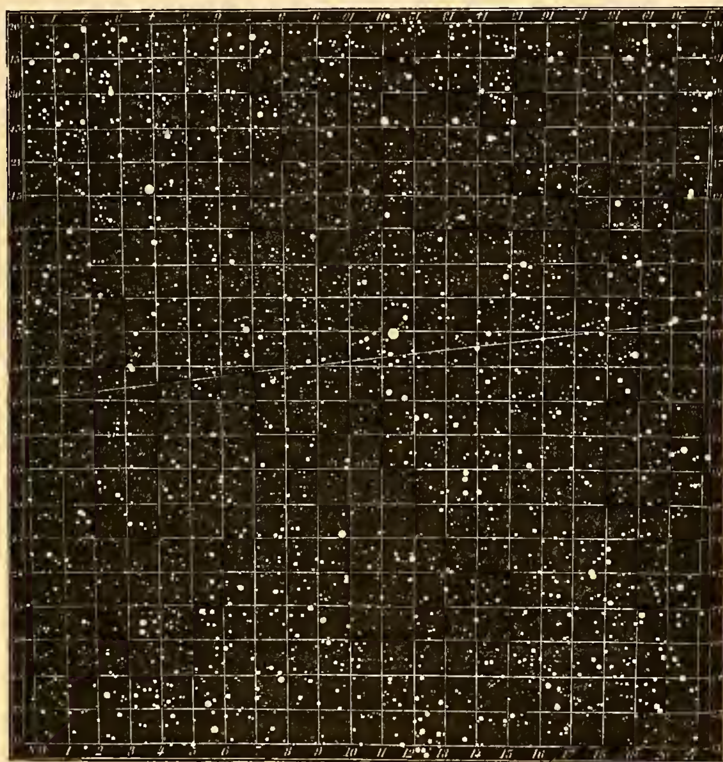


Fig. 149. Carte de l'atlas écliptique, par Chacornac.

Toutes les étoiles des treize premières grandeurs s'y trouvent marquées. Muni d'une carte de ce genre et d'une lunette astronomique assez puissante pour permettre de voir dans le ciel toutes les étoiles inscrites dans la carte, l'observateur qui voudra se livrer à la recherche des petites planètes procédera de la façon suivante. Il disposera au foyer de sa lunette 6 fils se coupant deux à deux à angles droits et éloignés l'un de l'autre, de façon à embrasser dans le ciel précisément le même

espace qu'un des petits carrés de la carte. Puis il braquera son instrument sur la région du ciel représentée par la portion de la carte qu'il veut explorer, de façon à comparer successivement tous les carrés aux parties correspondantes du ciel. Il peut ainsi s'assurer s'il y a identité dans le nombre et les positions des étoiles marquées et des étoiles observées. Vient-il à trouver dans la lunette un point lumineux qui ne soit pas marqué sur la carte? De deux choses l'une : la carte étant bien faite, il se peut que le nouvel astre soit une étoile d'éclat variable, et qui n'était pas visible à l'époque de la construction; ou bien, l'observateur a affaire à une planète nouvelle. Comment distinguer ces deux hypothèses également possibles? En examinant si l'astre nouveau reste invariablement fixé au même point, ou au contraire, s'il se meut relativement aux étoiles voisines : le mouvement propre d'une planète est en général assez sensible, pour que l'observateur puisse le constater dans la nuit même de l'observation. Dans ce dernier cas, il a trouvé une nouvelle planète[1], ou peut-être

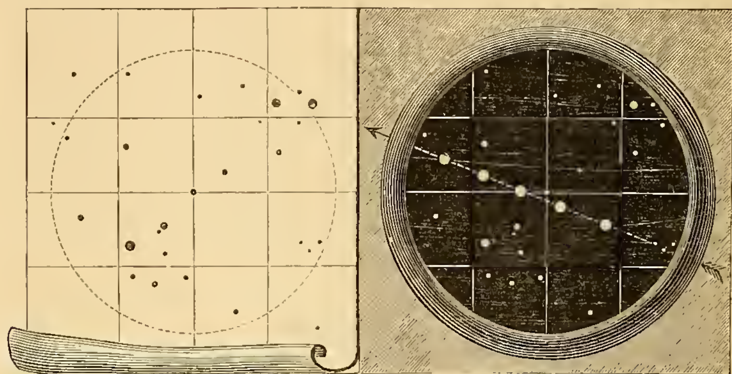


Fig. 150. Recherche des petites planètes à l'aide des cartes écliptiques.

1. Il est possible que l'étoile dont l'observateur vient de constater le mouvement propre, soit l'une des petites planètes déjà connues. Il faut donc comparer la position, au jour et à l'heure de la découverte, avec celles que donnent les éphémérides de ces corps. S'il n'y a coïncidence avec aucun de ces derniers, l'astre trouvé est décidément une nouvelle petite planète.

une comète. Je ne puis entrer ici dans le détail des manœuvres délicates qui ont pour objet la vérification du mouvement propre. La figure 150, qui représente à gauche un fragment de la carte même, à droite le champ de l'instrument, suffira à donner une idée du résultat. On peut y voir le point lumineux qui, par ses positions successives sur le champ étoilé, indique la présence d'un astre appartenant au monde solaire.

C'est un travail demandant, comme on voit, beaucoup de patience, de perspicacité et de sang-froid, que la recherche de ces petits astres, dont l'éclat est ordinairement compris entre la 10ᵉ et la 14ᵉ grandeur. Mais si le zèle des chercheurs est grand et méritoire, celui des astronomes qui se vouent à l'étude des petites planètes, au calcul des éléments de leurs orbites et de leurs éphémérides, et à l'observation continue, seule susceptible de perfectionner les tables, n'est pas moindre. L'Observatoire de Paris et celui de Greenwich ont dû se partager cette tâche très-laborieuse.

Ajoutons que la construction des cartes écliptiques est non moins laborieuse que la recherche même des petites planètes, à laquelle elle est d'ailleurs avec raison souvent associée. En France, Chacornac a commencé, sous les auspices de M. Valz à Marseille, et continué à l'Observatoire de Paris, un atlas écliptique, donnant les étoiles jusqu'à la 13ᵉ grandeur : on n'avait auparavant que les cartes de Berlin, ne donnant les étoiles que jusqu'à la 12ᵉ grandeur. Deux jeunes astronomes, MM. Paul et Prosper Henry, en ont entrepris la continuation, qui s'exécute aujourd'hui aux Observatoires de Paris et de Marseille, avec la collaboration de plusieurs autres savants. Ce travail a déjà procuré la découverte d'une douzaine de nouvelles planètes.

Voici, du reste, une liste des principaux astronomes qui ont enrichi cette branche de l'astronomie, avec le nombre des planètes qu'ils ont trouvées :

C.-H. Peters (à Clinton, États-Unis)	22	Chacornac (Marseille et Paris)	8
Luther (Bilk.)	20	Borelly (Marseille)	7
Watson (Ann-Arbor)	18	Pogson (Madras)	6
Goldschmidt (Paris)	14	Tempel (Marseille)	5
Hind	10	Prosper Henry (Paris)	5
De Gasparis (Naples)	9	Paul Henry (Paris)	5
Palisa (Pola)	9	Perrotin (Toulouse)	3

En résumé, sur 164 petites planètes aujourd'hui connues, les astronomes français revendiquent la découverte de 48, et même de 50, si l'on en compte deux qui ont été découvertes simultanément par Chacornac et d'autres astronomes.

VII

JUPITER ♃.

§ 1. ÉLÉMENTS DE L'ORBITE. — DISTANCES AU SOLEIL ET A LA TERRE; DIMENSIONS.

De la région du monde solaire où nous venons de voir que circulent les plus petits astres de notre système, nous passons sans transition à la plus volumineuse de toutes les planètes, au colossal Jupiter.

A l'œil nu, Jupiter apparaît comme une étoile de première grandeur, dont l'éclat, variable avec sa distance à la Terre, rivalise quelquefois avec celui de Vénus, et est assez grand pour donner des ombres aux objets; avec cette restriction toutefois que l'observation demande à être faite dans une chambre obscure, et à une époque voisine de l'opposition de la planète. Sa lumière est calme : elle ne scintille que dans des cas très-rares. Mais si, pour l'examiner, on vient à se servir d'une lunette un peu puissante, le point lumineux se change par le grossissement en un disque nettement terminé, le plus souvent accompagné de trois ou quatre petites étoiles qui oscillent en des temps assez courts autour de la planète centrale : ces quatre étoiles sont les satellites de Jupiter. Vénus, Mercure et Mars, nous l'avons vu, sont privés de compagnons; la Terre n'en a qu'un. Jupiter, avec ses quatre

lunes, que la puissante attraction de sa masse oblige à circuler autour de lui, va donc nous présenter le spectacle d'un petit monde, analogue au monde solaire dont il fait partie, et qu'il semble reproduire sur une plus petite échelle.

Jupiter accomplit sa révolution autour du Soleil en un peu moins de 12 années (11 ans 314ʲ76 ou 4332.6 jours moyens terrestres). L'orbite qu'il décrit dans cette période est une ellipse dont l'excentricité, égale à 0.048, est ainsi près du triple de l'excentricité de l'orbite terrestre, et dont le plan est très-peu incliné sur le plan de l'écliptique (de 1° 18′ 40″). Il résulte de ces données que les distances moyennes et extrêmes de Jupiter au Soleil sont les suivantes :

	DISTANCE de la Terre au Soleil = 1.0000.	Kilomètres.
Distance périhélie.	4.9518	732 000 000
— moyenne.	5.1028	770 000 000
— aphélie.	5 4537	807 000 000

L'orbite de Jupiter offre un développement de plus de quatre milliards huit cents millions de kilomètres, ou de douze cents millions de lieues. La vitesse moyenne de la planète est donc de 1 115 000 kil. par jour, 12 900 mètres par seconde, c'est-à-dire égale aux 43 centièmes environ de la vitesse de la Terre.

Jupiter étant, comme Mars, une planète supérieure, se trouve tantôt en opposition, tantôt en conjonction avec la Terre et le Soleil : en un mot, son mouvement apparent est analogue à ceux de Mars et des petites planètes, et sa révolution synodique présente les mêmes alternatives de mouvement apparent direct, séparé du mouvement rétrograde par deux stations, c'est-à-dire par deux positions où Jupiter semble stationnaire sur la voûte étoilée. L'explication de ces apparences est identique à celle que nous avons donnée du mouvement de Mars. Seulement, la durée de la révolution syno-

dique est moindre; elle ne s'élève qu'à 399 jours, dont 121 sont employés par Jupiter à parcourir l'arc rétrograde, et les 278 autres à accomplir son mouvement direct.

Des mouvements simultanés de la Terre et de Jupiter sur leurs orbites respectives, des positions relatives qui en sont la conséquence, il résulte que les deux planètes sont à des distances l'une de l'autre continuellement variables. Aussi voit-on varier en sens inverse les diamètres apparents du disque de Jupiter observé au télescope. A l'époque des oppositions correspondent des dimensions plus grandes qu'à l'époque des

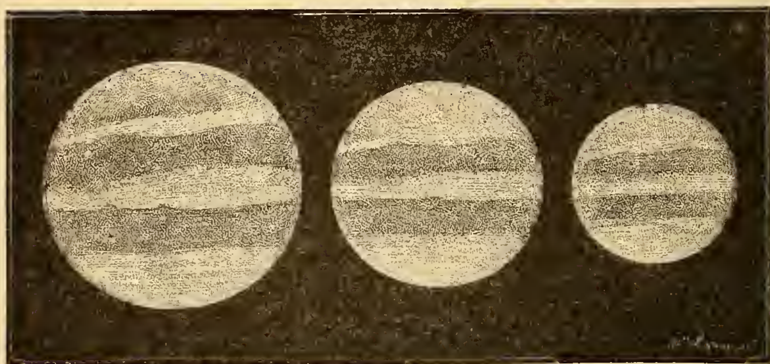


Fig. 151. Dimensions apparentes relatives du disque de Jupiter, à ses distances extrêmes et à sa distance moyenne de la Terre.

conjonctions où les deux astres sont à leur plus grand éloignement[1]. En résumé, à la distance moyenne de Jupiter à la Terre, son diamètre mesure 38″.10; à sa distance maximum, qui est de 955 millions de kilomètres, le diamètre se réduit à 30″; et enfin, il atteint 47″ dans les oppositions les plus favorables, c'est-à-dire, quand la distance des deux planètes n'est plus

1. La position du périhélie et de l'aphélie de Jupiter relativement à l'orbite terrestre est telle, que les distances minima de la planète à la Terre correspondent aux oppositions qui ont lieu vers le mois d'octobre; les distances maxima sont aussi celles qui correspondent aux conjonctions tombant à la même époque de l'année.

que de 585 millions de kilomètres. Ces différences sont rendues sensibles dans les dessins de la figure 151.

Vu de la Terre, Jupiter paraît toujours au télescope sous la forme d'un disque lumineux, de forme elliptique, mais ne présentant pas de phases sensibles, bien que l'on soit assuré qu'il ne brille pas de sa lumière propre. Nous verrons plus loin qu'on a des preuves convaincantes de l'opacité de la planète, de sorte que l'absence de phases est une simple

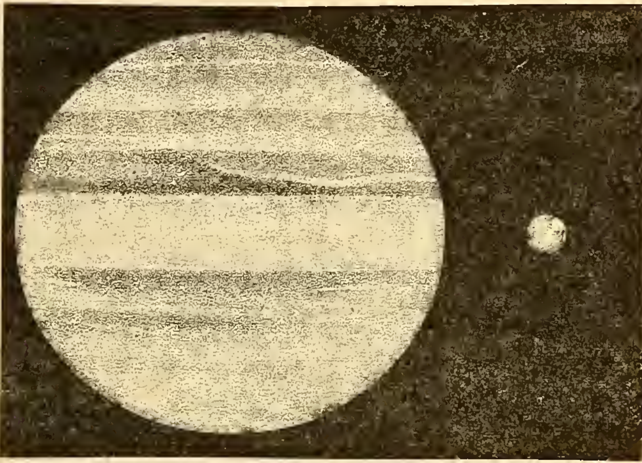


Fig. 152. Jupiter et la Terre; dimensions comparées.

conséquence de l'immensité de l'orbite de Jupiter, qui enveloppe toujours l'orbite terrestre à une grande distance.

Nous venons de dire que le diamètre équatorial de Jupiter, vu de la Terre ou du Soleil à sa moyenne distance, mesure 38″.01. On en déduit aisément ce qu'il serait à la distance 1; le calcul donne 197″.76 pour ce diamètre, soit 98″.88 pour le rayon de l'équateur de la planète. Et comme la parallaxe du Soleil est 8″.86, le rapport des nombres 98″.88 et 8″.86 est égal à celui des rayons équatoriaux de Jupiter et de la Terre. Il suit de là que Jupiter a un diamètre qui vaut plus de onze fois (11.143) celui de notre globe.

Mais Jupiter n'est pas sphérique : son disque offre un aplatissement très-sensible aux deux extrémités d'un diamètre qui est son axe de rotation. De nombreuses mesures des deux diamètres, équatorial et polaire, ont donné pour l'aplatissement des nombres assez différents[1] ; mais aujourd'hui on s'accorde généralement à l'évaluer à $\frac{1}{17}$, c'est-à-dire à regarder les nombres 16 et 17 comme marquant le rapport des deux diamètres. Aussi, tandis que le diamètre de l'équateur de Jupiter mesure en nombres ronds 142000^k et la circonférence équatoriale 445 720^k, le diamètre polaire ne vaut que 133 500^k, et l'ellipse méridienne 434000^k seulement. La dépression, à chaque pôle de l'immense globe, est d'environ 4200 kilomètres, à peu près le tiers de l'épaisseur totale du globe terrestre.

Le tableau suivant résume les dimensions de Jupiter rapportées à celles de la Terre, ainsi que leurs valeurs métriques :

	Terre = 1	En kilomètres.
Diamètre équatorial. . . .	11.143	142 000^k
Circonférence équatoriale.	11.143	445 700
Ellipse méridienne. . . .	11.143	434 000
Surface de Jupiter	114.130	—
Volume de Jupiter[2].	1226.400	—

1. Voici quelques-unes de ces déterminations :

Cassini I (1691)	$\frac{1}{15}$	Arago (1812-1814)	$\frac{1}{17}$
Pound (1719).	$\frac{1}{13}$	Struve	$\frac{1}{13.7}$
Rochon (1777)	$\frac{1}{16}$	Beer et Mædler (1839). . .	$\frac{1}{20}$
Short.	$\frac{1}{14}$	Hansen.	$\frac{1}{14}$
Schrœter (1785)	$\frac{1}{12}$	Arago (1835-1842)	$\frac{1}{17.1}$

Cette dernière mesure, déduite d'observations micrométriques faites par Arago, donne 38".01 pour le diamètre équatorial et 35".79 pour le diamètre polaire de Jupiter à sa distance moyenne. C'est celle que nous avons adoptée. La première de toutes a eu, ainsi qu'Humboldt le fait remarquer, une importance scientifique considérable, par l'influence que « l'aplatissement reconnu par Cassini eut sur les idées de Newton, touchant la figure du globe terrestre. »

2. Dans le tableau de la page 231, on trouve pour le volume de Jupiter

Comparé au volume du Soleil, celui de Jupiter en est la 1035ᵉ partie environ. Si nous pouvions nous rapprocher de lui à une distance égale à celle de la Lune, son globe nous apparaîtrait sous un diamètre apparent de 21°, environ 40 fois aussi considérable que celui de notre satellite lui-même, et la portion de la voûte céleste que couvrirait son disque n'équivaudrait pas à moins de 1600 fois l'espace occupé par la pleine Lune.

§ 2. ROTATION DE JUPITER.

Dès que l'invention des lunettes eut permis de distinguer nettement la forme de Jupiter, on vit sur son disque des taches grisâtres, sous forme de bandes à peu près parallèles. Cassini attribue la découverte des bandes à Galilée; d'autres prétendent qu'elles ont été vues pour la première fois à Rome, par le P. Zucchi, en 1630; quoi qu'il en soit, c'est Cassini I qui en fit le premier une observation assidue dès juillet 1665, et qui, par l'observation du mouvement d'une tache sur le disque, découvrit le mouvement de rotation de la planète et en détermina la durée. La tache observée par l'illustre astronome lui parut se mouvoir d'Occident en Orient et effectuer une rotation entière en $9^h 55^m 53^s$: tel est le nombre qu'il donne comme le résultat d'observations séparées par un intervalle de 8 années, de 1665 en 1674; il crut revoir la même tache en 1685 et 1687, puis en 1692, 1694 et 1708. A cette der-

1389.996, nombre beaucoup plus fort que celui que nous donnons ci-dessus. Le premier est emprunté à l'*Annuaire du Bureau des Longitudes* qui part des mêmes données que nous, savoir la parallaxe de 8″.86, l'aplatissement de Jupiter $\frac{1}{17.1}$ et le diamètre apparent de son disque à la distance 1, 197″.76, mais le calculateur de ce recueil a supposé Jupiter sphérique, tandis que nous avons tenu compte, pour la comparaison des volumes et des surfaces, aussi bien de la forme ellipsoïdale de Jupiter que de celle de la Terre La différence n'est pas négligeable, tant s'en faut; elle a surtout son importance quand, de la masse et du volume, on passe à la densité.

nière date, Cassini assignait à la rotation de Jupiter une durée de $9^h 55^m$ et 48^s. Maraldi, W. Herschel, Schrœter dans le siècle dernier, puis, dans le nôtre, Airy, Beer, Mædler et Schmidt, ont mesuré la durée de la rotation par l'observation des retours successifs d'une même tache au centre du disque ; mais les résultats, bien que peu différents, varient cependant non-seulement d'une tache à l'autre, mais encore pour une même tache selon la période de rotation[1]. Il importe, du reste, en

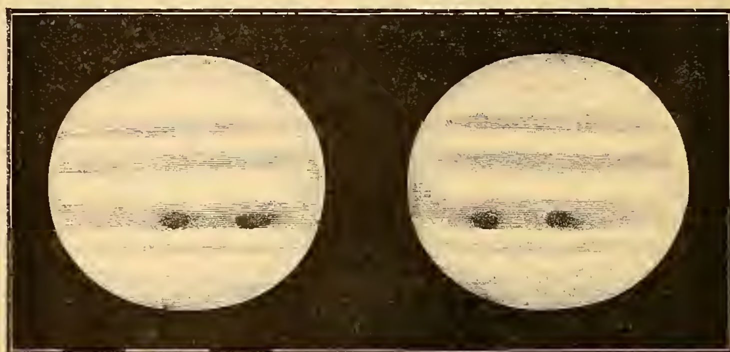


Fig. 153. Rotations de Jupiter. Taches observées par Beer et Mædler le 13 décembre 1834, vues à 37 minutes 15 secondes d'intervalle

adoptant la moyenne des déterminations effectuées, qui est $9^h 55^m 41^s.2$, de ne pas oublier que les taches qui ont servi à

1. Transcrivons ici quelques-uns des résultats obtenus :

Cassini I (1665-1666) .	9^h	56^m	0^s	Sylvabelle (1777) . . .	9^h	56^m	0^s
— (1665-1672) . .	9	55	51	Schrœter (1790)	9	55	33
— (1665-1674) . .	9	55	53.5	Beer et Mædler (1834-35)	9	55	23.5
— (1685-1687) . .	9	55	52	Airy (1834-1835). . . .	9	55	28.7
— (1692-1708) . .	9	55	48	Schmidt (1862).	9	55	24.2
W. Herschel (1778). .	9	55	16				

La moyenne de tous ces nombres serait $9^h 55^m 41^s.2$. On remarquera que l'accord est bien loin d'être aussi satisfaisant que pour les déterminations de la rotation de Mars : c'est que le disque de cette dernière planète offre des taches dont la permanence est certaine, de sorte que, plus le nombre des observations va croissant, plus on approche d'obtenir la rotation vraie. Dans Jupiter, outre que les accidents sont variables, il paraît certain que la durée de la rotation dépend de leur position ou de leur distance équatoriale.

l'obtenir, sont généralement des taches situées à une certaine distance de l'équateur. Plus cette distance diminue, plus la période de rotation s'accourcit. C'est ainsi que Cassini a trouvé $9^h 51^m$ (en 1690-1691) pour une tache voisine du centre; puis $9^h 50^m$ (en 1692) pour une tache voisine de l'équateur. En 1779, W. Herschel a pareillement trouvé $9^h 51^m 45^s$, puis $9^h 50^m 58^s$; il s'agissait d'une tache équatoriale.

Il semble donc que la rotation du globe de Jupiter, telle du moins que nous permettent de la déterminer les bandes et les taches de son disque, suit une loi qui présente de l'analogie avec celle que les taches solaires nous ont montrée pour la rotation du Soleil : la vitesse du mouvement va en décroissant avec la latitude. L'analogie est plus complète encore, si l'on remarque avec M. J. Schmidt que « les diverses parties d'une même tache donnent des durées de rotation qui diffèrent de 50 secondes », ce qui tient évidemment aux déplacements ou aux mouvements propres de ces parties[1].

La rotation a été généralement déduite de l'observation des taches claires ou des taches sombres, c'est-à-dire des parties les plus brillantes ou les plus noires des bandes ; ce sont les accidents qui offrent la plus grande permanence ; mais les bandes elles-mêmes, leurs extrémités, les points de leurs divisions ont servi quelquefois. La figure 154 qui donne divers aspects successifs du disque de Jupiter, à 1 heure d'intervalle, permet aisément de reconnaître et de mesurer le mouvement progressif des taches ou celui des bandes, entraînées les unes et les autres par la rotation.

On voit, en résumé, que le jour sidéral sur Jupiter a une durée qui ne dépasse guère les 2/5 du nôtre; ou, si l'on veut, la vitesse angulaire de rotation est près de 2 fois et demie celle

1. Cet astronome a observé, en juin 1865, des taches de Jupiter, les unes situées dans l'hémisphère nord et donnant $9^h 54^m$ pour la rotation, les autres dans l'hémisphère sud et donnant $9^h 51^m$. Outre la différence des latitudes, en existerait-il une aussi, à latitudes égales, pour les deux hémisphères?

de la rotation terrestre; mais, la vitesse linéaire ou de déplacement de chaque point de l'immense globe est, à latitude égale, bien plus considérable encore qu'un point du globe terrestre. A l'équateur, par exemple, cette vitesse atteint 748 kilomètres par minute, 12 460 mètres ou plus de 3 lieues par seconde; c'est 27 fois au moins celle d'un point de l'équateur de la Terre. La force centrifuge qui résulte de ce



Fig. 154. Rotation de Jupiter. Mouvement des taches et des bandes, dans un intervalle d'une heure. Observations du 13 octobre 1856, par J. Chacornac.

mouvement rapide suffit, selon Laplace, pour diminuer de $\frac{1}{12}$ la pesanteur équatoriale.

Un mot maintenant des jours et des nuits, des saisons ou de la climatologie de Jupiter, en tant du moins qu'elle dépend des éléments astronomiques de l'orbite et de la rotation.

L'axe autour duquel tourne le globe de Jupiter est presque perpendiculaire au plan de l'orbite (l'angle vaut 86° 54'). Il y a donc peu de différence, dans le cours d'une année de la planète, entre les durées du jour et celles de la nuit aux diverses latitudes. De l'équateur où ces durées sont nécessairement égales et constantes (chacune est de $4^h 57^m 50^s$), jusqu'à la

latitude, boréale ou australe, de 86° 54′, elles varient lentement; et le plus long jour ou la plus longue nuit de ces deux zones qui atteignent presque les pôles, n'excède pas les $9^h 56^m$ de la rotation. A la vérité deux étroites zones polaires, d'un peu plus de trois degrés chacune, ont des jours ou des nuits qui dépassent la durée de la rotation : à chacun des pôles même, le Soleil reste visible pendant une demi-année de Jupiter pour disparaître absolument pendant un intervalle de temps aussi long, c'est-à-dire pendant près de six années terrestres.

En effet, l'année de Jupiter, nous l'avons vu, ne dure pas moins de 4332 de nos jours, ou un peu moins de 12 années.

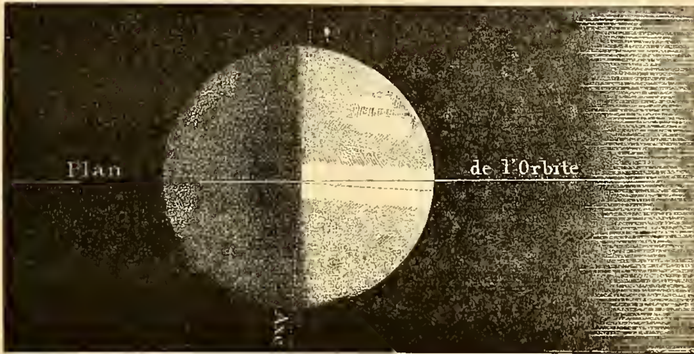


Fig. 155. – Inclinaison de l'axe de rotation de Jupiter sur le plan de l'orbite.

Cette longue période comprend 10 478 rotations, 10 478 jours sidéraux et par suite 10 477 jours solaires. Il n'y a donc guère que 3 secondes de différence entre le jour solaire de la planète et son jour sidéral.

Astronomiquement parlant, les saisons de Jupiter sont donc très-peu variées, à cause de la faible inclinaison du plan de son orbite sur celui de son équateur. L'été règne pendant la longue période de sa révolution dans les zones équatoriales, tandis que les régions tempérées jouissent d'un printemps perpétuel, et qu'enfin un hiver presque continu est le lot des zones polaires. Pour se faire une idée de ce qu'y sont les alter-

natives des saisons, il faut se rappeler d'ailleurs que chacune d'elles dure près de trois de nos années, que l'été et le printemps durent ensemble plus de 6 ans, l'automne et l'hiver environ 5 ans et 7 mois.

La masse de Jupiter a été déduite du mouvement de ses satellites et trouvée égale à $\frac{1}{1047.3}$ de la masse du Soleil[1]. Si l'on adopte pour la masse de la Terre le nombre $\frac{1}{325000}$, déduit de la nouvelle parallaxe 8″.86, on voit que la masse de Jupiter vaut environ 310 fois la masse de notre globe. Sa densité est 0.2426, si l'on prend pour unité la densité du globe terrestre, et 1.37, si on la compare à celle de l'eau : c'est à peu de chose près la densité de la houille. Enfin, la pesanteur à la surface a, sur Jupiter, une intensité égale à 2.495 fois celle de l'intensité de la pesanteur terrestre. Si l'on admet avec Laplace, que le globe de Jupiter n'est pas homogène, que la densité des couches qui composent le globe de la planète va, comme celle des couches terrestres, en croissant de la surface au centre, les couches superficielles n'y sont sans doute pas plus denses que l'eau. Il est donc fort possible que la surface de Jupiter soit liquide, si la température toutefois n'est pas assez faible pour y maintenir à l'état solide les substances légères dont nous parlons. On ne doit pas oublier, en effet, qu'à la distance où Jupiter se trouve du Soleil, l'intensité de la lumière et de la chaleur reçues par la planète n'est plus que les 37 millièmes de l'intensité de la chaleur et de la lumière solaires, au moment où elles arrivent à la surface de notre globe. Jupiter est donc 27 fois moins échauffé et éclairé que

1. Laplace donnait, dans la *Mécanique céleste*, le nombre $\frac{1}{1067.09}$, d'après les observations du 4e satellite. Des observations plus précises ont donné depuis, par la même méthode, à M. Airy $\frac{1}{1046.77}$. Bessel a trouvé $\frac{1}{1047.9}$, Jacob $\frac{1}{1047.57}$; Möller, d'après les perturbations de la comète de Faye, $\frac{1}{1047.79}$, et le professeur Kruger, d'après les perturbations de Thémis, $\frac{1}{1047.51}$. Ces cinq derniers résultats ne diffèrent pas entre eux de la 1000e partie de leur valeur moyenne. Nous avons écrit, en nombre rond, d'après l'*Annuaire* $\frac{1}{1050}$, dans notre tableau de la page 231.

la Terre; mais cela ne peut s'entendre évidemment que de l'insolation aux limites des atmosphères des deux planètes, et il faudrait, pour tirer de là quelques conséquences vraisemblables sur la météorologie de Jupiter, connaître la constitution de son enveloppe atmosphérique et aussi celle du sol lui-même. Ceci nous amène à dire ce qu'on peut préjuger de cette constitution, dans l'état actuel des connaissances astronomiques.

§ 3. CONSTITUTION PHYSIQUE DE JUPITER. — ZONES LUMINEUSES ET BANDES OBSCURES.

Le disque de Jupiter, comme on peut s'en rendre compte en examinant les dessins de son disque que reproduisent nos figures, et notamment la planche XVI, fac-simile d'un magnifique dessin de M. Warren de la Rue, est généralement sillonné de bandes grisâtres, plus ou moins sombres, séparées par des espaces plus lumineux. Leur nombre, leurs positions, leur étendue ne restent pas toujours les mêmes : on en a vu quelquefois jusqu'à huit, tandis qu'à d'autres époques une seule persistait; cette dernière, la plus large de toutes, et qu'on voit presque toujours, est située dans l'hémisphère boréal, et très-voisine du centre de la planète. Une autre bande obscure, située dans l'hémisphère austral, et aussi près du centre, est également presque permanente. Cependant l'une et l'autre ont disparu à la fois : Helvétius, W. Herschel ont observé Jupiter, le premier en 1647, le second en 1793, sans que son disque offrît aucune trace de bandes.

Les bandes principales sont presque toujours parallèles à l'équateur de Jupiter; et parmi les autres, plus étroites ou plus éloignées de la partie centrale, et qui d'ailleurs apparaissent ou disparaissent parfois en quelques heures, les unes sont parallèles à cette même direction, les autres affectent

une direction plus ou moins inclinée à la première. Enfin, outre ces zones de forme longitudinale, on voit de temps à autre des taches particulières, de formes variées : c'est à l'aide de ces taches, le plus souvent adhérentes aux bandes obscures, et qui en forment les accidents, qu'on a déterminé la durée du mouvement de rotation, et l'on sait que certaines d'entre elles sont restées visibles pendant des années. Si même on en croit Cassini et Maraldi, l'une d'elles, observée en 1665 pour la première fois et disparue deux ans après, reparut au même point en 1672, en 1677, en 1685, et ce serait encore la même

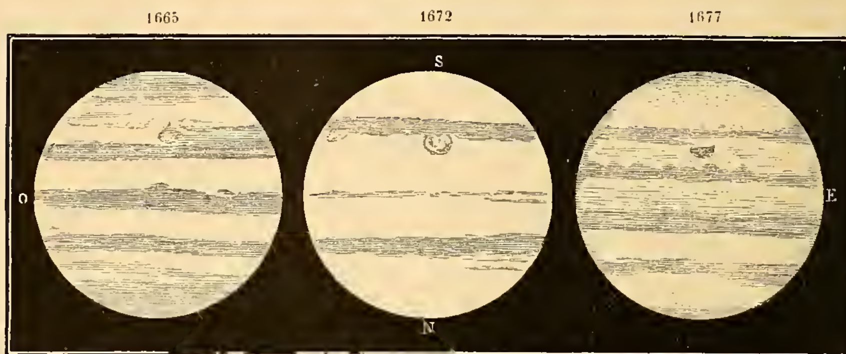
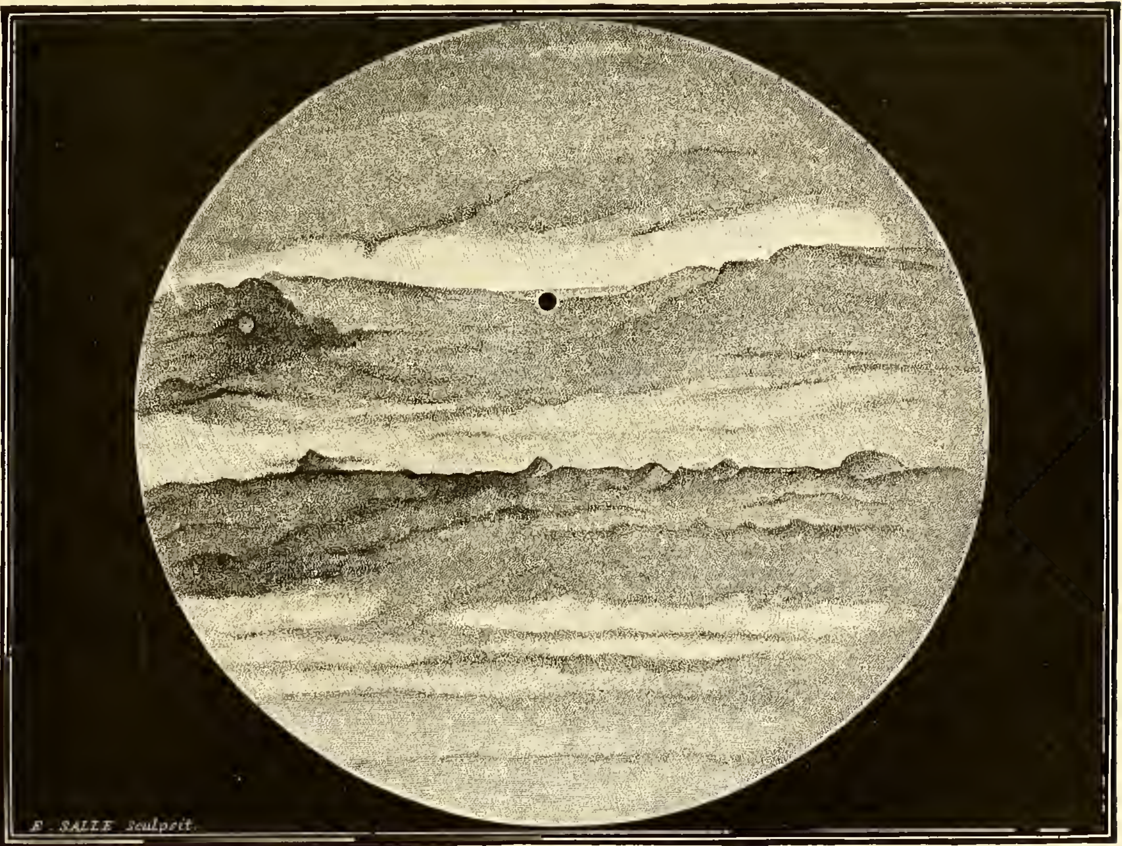


Fig. 156. Tache observée par D. Cassini pendant un intervalle de vingt années; observations de 1665 à 1677.

tache que Maraldi revit en 1713, c'est-à-dire 48 ans après sa première apparition constatée.

La planche XVI donne l'aspect que présentait Jupiter le 13 octobre 1856; elle montre son disque traversé par deux larges bandes obscures situées de part et d'autre de l'équateur, et séparées par une zone brillante. Deux autres zones brillantes, dont l'une est sillonnée de bandes beaucoup plus étroites, limitent les deux premières du côté des pôles. L'éclat lumineux du disque vers ces dernières régions est notablement plus faible que dans la zone équatoriale, ainsi que dans les deux zones brillantes limitant les bandes sombres de la planète. Ces phénomènes sont fort intéressants : mais qu'en peut-



JUPITER

D'après un dessin de Warren de la Rue.

on conclure relativement à la constitution physique de Jupiter? Il y a un premier point qui ne semble pas contestable, c'est que le parallélisme à peu près constant des bandes, dans le sens de l'équateur et des parallèles de la planète, s'explique par le mouvement de rotation, par la vitesse angulaire considérable de ce mouvement. En vertu de ce mouvement même, s'il y a à la surface de Jupiter des parties fluides, liquides ou gazeuses, on conçoit que la vitesse avec laquelle elles sont entraînées, tende à les disposer en longues bandes semblables à celles qu'on observe; et, comme c'est à l'équateur que la vitesse absolue est la plus grande, c'est là aussi que ces masses devront s'accumuler en plus grande partie. C'est ce que l'observation constate en effet. Voici quelle est, d'après W. Herschel, la cause physique des bandes de Jupiter. Le passage suivant, extrait d'un de ses Mémoires publié en 1793, est cité par Arago dans sa notice sur l'illustre astronome :

« Je suppose, dit-il, que les bandes brillantes et les régions polaires de Jupiter dont la lumière surpasse celle des bandes faibles ou jaunâtres, sont les zones où l'atmosphère de cette planète est le plus remplie de nuages. Les bandes faibles correspondent aux régions dans lesquelles l'atmosphère, complétement sereine, permet aux rayons solaires d'arriver jusqu'aux portions solides de la planète où, suivant moi, la réflexion est moins forte que sur les nuages. »

Dans un Mémoire précédent, W. Herschel attribuait à des vents réguliers, dont la cause serait analogue à celle qui produit les alizés terrestres, la réunion en bandes parallèles des nuages de l'atmosphère équatoriale de Jupiter. Il y a un fait d'observation qui confirme jusqu'à un certain point l'exactitude de cette hypothèse. C'est celui-ci : les bandes obscures et les zones brillantes ne sont visibles que dans les régions centrales, elles s'affaiblissent près des bords du disque. D'après Beer et Mædler, les taches s'évanouissent $1^h\ 25^m$ environ après leur passage au centre, c'est-à-dire, quand elles

occupent une position dont la différence de longitude avec le centre est d'environ 54° ; cela suppose une atmosphère très-dense, en admettant que la cause d'affaiblissement de la visibilité des taches provienne de l'interposition de couches atmosphériques de plus en plus profondes. La lumière réfléchie par les parties diaphanes de l'atmosphère doit en effet aller en croissant à mesure que les rayons visuels traversent plus obliquement les couches, c'est-à-dire à mesure que l'œil observe des régions plus voisines des bords. Le contraire arrive pour les nuages ou les parties opaques de l'atmosphère de Jupiter : elles paraissent d'autant moins brillantes que les rayons solaires les éclairent plus obliquement. Ainsi, d'une part, les taches et bandes obscures semblent moins sombres à mesure qu'elles s'éloignent du centre, et les zones brillantes perdent de leur éclat vers les bords. La différence d'éclat des unes et des autres diminue, et finit par devenir assez faible pour qu'on ne puisse plus les distinguer.

En résumé, l'explication des bandes lumineuses et obscures est assez satisfaisante, si l'on regarde les zones brillantes comme des masses de nuages, et les autres comme les parties transparentes de l'atmosphère. Mais, est-ce la partie solide de Jupiter qu'on aperçoit à travers celle-ci, et, dans ce cas, que sont les taches plus sombres, plus ou moins permanentes, qui ont servi à mesurer la rotation ? Si ce sont des parties liquides par exemple, de la surface, pourquoi ne s'accordent-elles pas toutes à donner la même durée pour le mouvement de rotation ; pourquoi accusent-elles une rotation d'autant plus rapide qu'elles sont plus équatoriales ? Le mouvement propre que cette différence de vitesse a forcé d'attribuer aux taches, a été expliqué par l'existence de contre-alizés analogues aux vents supérieurs qui règnent, sur notre globe, au-dessus de la région des alizés proprement dits.

Cassini avait insisté sur le fait de la rotation plus rapide des taches, à mesure qu'elles sont plus rapprochées de l'équateur :

« Au commencement de l'année 1692, dit-il, il parut des taches qui étoient près de l'équinoxial de Jupiter, dont la période n'étoit que de 9 heures 50 minutes, et généralement toutes les taches qui passèrent plus près du centre de Jupiter, parurent avoir un mouvement plus vite que celles qui en étoient plus éloignées. Ces taches qui avoient un mouvement plus prompt que les autres, étoient aussi plus près de son équinoxial, qui est parallèle aux bandes ; ainsi, suivant l'analogie des bandes de Jupiter avec nos mers, on pourroit comparer le mouvement de ces taches à celui des courants, qui sont plus grands près de l'équateur de la Terre que dans tout autre endroit. »

Fontenelle, puis W. Herschel admirent, pour l'explication de la formation des bandes, l'existence des vents alizés dans Jupiter. Le principal effet de ces vents est de réunir les vapeurs équatoriales en bandes parallèles. De plus, ils entraînent les taches ou nuages accidentels avec des vitesses variables. De là, les diverses valeurs obtenues pour la durée de la rotation. Arago, en rapportant cette opinion, fait une réserve sur la direction de ces vents qui, d'après lui, souffleraient dans une direction opposée à celle des alizés terrestres, puisque ces derniers, tendant vers l'ouest, ralentiraient le mouvement de rotation au lieu de l'accélérer. Pour résoudre cette difficulté, il suffit d'admettre que ce sont les alizés supérieurs ou contre-alizés qui déterminent le mouvement propre des taches[1].

1. C'est l'hypothèse qu'on adopte aujourd'hui, et elle explique en effet le phénomène dont il s'agit ici. Mais nous ferons remarquer que, même en considérant les alizés proprement dits comme ceux qui donnent lieu au mouvement propre des taches, on peut rendre compte du même phénomène. Si les taches sont des accidents atmosphériques ayant un mouvement propre, comme tous les astronomes le pensent, ce n'est pas la rotation du globe de Jupiter qu'on détermine, mais la rotation des nuages ou mieux la différence de durée de la rotation de Jupiter et du mouvement propre du nuage. Or, si l'on suppose que ce nuage se forme à une latitude donnée, puis soit entraîné vers l'équateur par une cause analogue à la cause des vents alizés terrestres, son mouvement de rotation éprouvera un retard, mais ce retard

En résumé, tout ce qu'on doit inférer de l'étude des bandes et des taches dont le disque de Jupiter est sillonné, c'est que cette planète est entourée d'une atmosphère sans doute très-dense, et dans laquelle des masses de vapeur analogues à nos nuages sont en suspension. Quelques-uns de ces accidents ont une durée parfois très-longue, et leurs mouvements propres sont assez lents : des taches examinées par Beer et Mædler n'étaient pas animées d'une vitesse supérieure à 35 lieues par 24 heures; c'est la vitesse d'un vent léger sur notre Terre. La stabilité de l'atmosphère de Jupiter est due sans doute aux faibles et lentes variations des saisons, et aussi à la grande intensité de la pesanteur à sa surface.

Les bandes de Jupiter, avons-nous dit plus haut, sont variables de forme, de nombre, de position et d'étendue. Il en est de même des taches sombres ou brillantes qu'on aperçoit plus fréquemment dans la zone équatoriale et dans les deux

sera d'autant plus considérable que la latitude du point où le nuage s'est formé sera plus grande. Les taches qui auront des points de départ plus voisins de l'équateur paraîtront se mouvoir plus vite que les autres, et c'est aussi ce que l'observation constate.

A la vérité, pour savoir quelle est la véritable explication, si c'est à l'existence d'alizés ou de contre-alizés que les phénomènes en question sont dus, il y aurait lieu de procéder à des observations plus précises, que les instruments astronomiques actuels rendraient comparativement plus faciles. En attendant, on ne peut guère que faire des conjectures. Nous avons émis plus haut l'opinion que les phénomènes observés à la surface de Jupiter ont une certaine analogie avec les phénomènes des taches solaires. Cette analogie nous semble tout au moins justifiée en ce qui concerne les mouvements propres des taches, dans l'un ou dans l'autre corps. On a vu que M. Faye explique les tourbillons ou trombes du Soleil par un effet mécanique dû à la différence de vitesse des éléments atmosphériques de latitudes diverses : sur Jupiter, la vitesse linéaire de la rotation est six fois aussi grande que celle d'un point du Soleil situé à égale latitude; la différence de vitesse de deux tranches contiguës est donc plus rapidement croissante ou décroissante, et dès lors la naissance des tourbillons y doit être beaucoup plus facile. Or, les dessins des taches obscures plus ou moins rondes qui se voient parfois dans les bandes, offrent des traces très-visibles d'une forme tourbillonnaire : on en voit plusieurs dans les bandes sombres du disque de la planche XVI *bis*.

zones obscures qui la limitent dans chaque hémisphère. Cependant les unes et les autres ont une permanence relative ; il serait certainement très-intéressant de faire une étude suivie de leurs variations, de voir si la disparition et la réapparition des mêmes apparences aux mêmes latitudes, aux mêmes longitudes et en définitive parfois aux mêmes points physiques du globe, sont des phénomènes soumis à une certaine périodicité. Dans le cas de l'affirmative, il y aurait lieu de comparer les périodes trouvées, soit aux époques climatologiques ou saisons de Jupiter, soit aux variations de la distance du Soleil[1], soit à la position relative des astres voisins, de ses satellites d'abord, de Mars, de Saturne ensuite. Ces dernières considérations ont une certaine force, si l'on songe que la faible inclinaison de l'axe de rotation, la longueur de l'année et la lente variation qui en résulte pour la position et la distance du Soleil, en chaque point du globe de Jupiter, sont autant d'éléments de stabilité des conditions atmosphériques : chaque climat y jouit pour ainsi dire d'un printemps perpétuel. Les seules causes de perturbation paraissent devoir résider dans les actions extérieures. Un savant anglais, M. Ranyard, a signalé la coïncidence de plusieurs maxima des taches de Jupiter (notamment des taches brillantes telles que les ont observées à diverses reprises en 1858, 1859 et 1860, MM. Huggins, Lassell, Airy, Keith, Murray, Webb, et récemment le professeur Mayer aux États-Unis, M. Gledhill en Angleterre, M. Flammarion en France) avec les périodes des maxima des taches solaires. « Si un examen plus complet des observations de Jupiter, dit-il, confirme le soupçon que Jupiter et le Soleil ont des périodes égales dans les perturbations de leurs surfaces, il faudra en conclure que les variations de

1. Cassini dit quelque part : « On n'a jamais vu tant de nouvelles taches que depuis septembre 1690. » Or, il est à remarquer que Jupiter était à la fois en opposition, ce qui rendait les observations plus aisées, et au périhélie ou à la plus petite distance du Soleil.

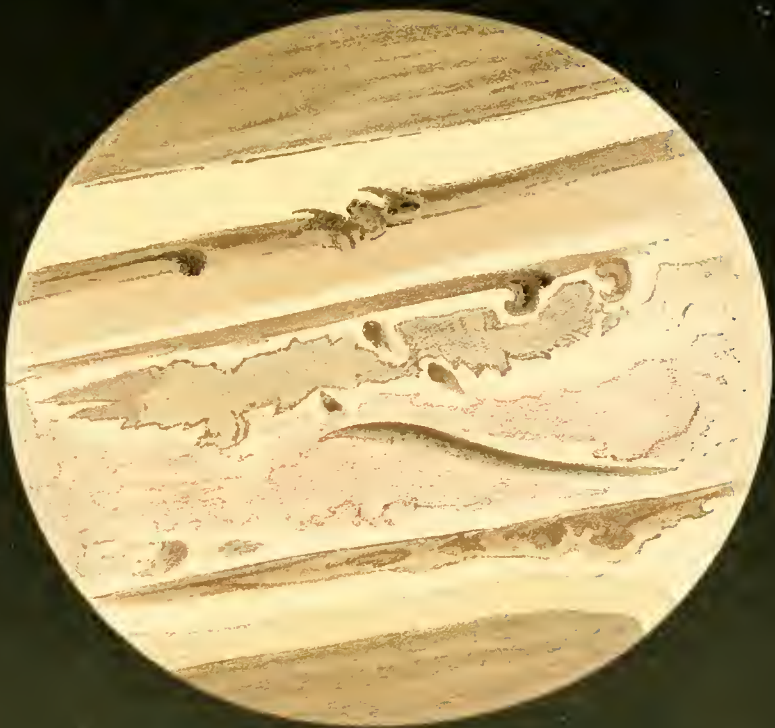
la planète sont sous la dépendance de quelque changement cosmique et ne sont point des effets de marée, ainsi que le Dr Wolf l'a suggéré pour le Soleil. »

Les bandes brillantes, aussi bien que les bandes sombres, ne se distinguent pas seulement les unes des autres par l'intensité lumineuse, mais aussi par des couleurs particulières. La figure 157 représente Jupiter, d'après un dessin de M. Lassel, où ce savant a noté les couleurs caractéristiques de chaque zone. La bande équatoriale était d'un brun orangé, les bandes obscures couleur pourpre, et une bande située au



Fig. 157. Jupiter le 30 décembre 1871, d'après un dessin de W. Lassel.

nord de l'équateur affectait une teinte de vert-olive brillant. Notre planche XVI *bis* montre Jupiter avec la diversité de teinte que lui a trouvée en janvier 1872 M. Tacchini. Les calottes polaires y ont une teinte bleuâtre ou gris cendré que les divers observateurs s'accordent à leur donner, quelle que soit l'époque de l'observation. Il paraît qu'il n'en est pas de même des bandes. La zone brillante équatoriale, notamment, est sujette à des variations de teinte qu'on n'a point encore cherché à expliquer. En octobre 1869, cette bande qui était antérieurement blanche et la plus brillante partie du disque, selon



F. Méheux. Chromolith Imp. Fraillery Paris

JUPITER

le 28 Janvier 1873, entre 11^h et $11^h\ 20^m$ t. m. de Palerme

d'après un Dessin et les Observations de P. TACCHINI

M. Browning, était devenue plus sombre que deux bandes blanches au nord et au sud et paraissait colorée d'une teinte d'un jaune verdâtre. Puis elle passa au gris, à une couleur cuivrée; puis en octobre 1870, à une teinte d'ocre bien caractérisée. Ces variations curieuses correspondent probablement à des changements atmosphériques que l'analyse spectrale parviendra peut-être un jour à définir[1].

On a cherché tout récemment, par l'analyse du spectre de la lumière de Jupiter, à obtenir sur la nature de l'enveloppe gazeuse de la planète quelques données plus positives. Voici ce qu'ont trouvé deux observateurs versés dans ce genre de recherches, MM. Huggins et Miller : « On voit, disent-ils, dans le spectre de Jupiter des raies qui indiquent l'existence autour de cette planète d'une atmosphère absorbante. Une bande foncée correspond à quelques raies atmosphériques terrestres, et indique probablement la présence de vapeurs semblables à celles de l'atmosphère de la Terre. Une autre bande n'a pas sa correspondante parmi les raies d'absorption de notre hémisphère, et nous signale la présence de quelque gaz ou vapeur n'existant point dans l'atmosphère terrestre. » D'après M. Vogel, c'est une question de savoir si cette bande obscure (dans le rouge, longueur d'onde 617.9) résulte de la présence d'un corps spécial à l'atmosphère de Jupiter, ou si elle provient du mélange des gaz dont elle est formée selon des proportions différentes de celles de l'air. « Il serait encore possible, dit-il, que la composition des deux hémisphères fût la même, mais que leur

1. La photographie pourra aussi fournir d'utiles indications. Un dessin de Jupiter, fait avec soin par M. Browning, dans la matinée du 24 octobre 1870, montre la bande équatoriale, de couleur d'ocre, marquée de trois taches ovales et blanches. Or, une photographie faite le même jour, dans l'Observatoire de M. Warren de la Rue, à quelques minutes d'intervalle, ne donne rien à cette même place. Le négatif est absolument transparent dans toute la zone en question, indiquant ainsi que sa lumière n'avait exercé aucune action sur la surface sensible du collodion. A d'autres époques, la même zone était tout à fait opaque (V. *Monthly notices*, n° de décembre 1870).

action sur les rayons solaires différât seulement, par suite des circonstances de température et de pression, tout autres à la surface de Jupiter de ce qu'elles sont sur notre planète. »

Le même savant ajoute : « Le spectre des bandes sombres du disque de Jupiter est caractérisé surtout par une absorption uniforme, très-marquée, que subissent les rayons bleus et violets. On ne voit point apparaître à ces places-là de nouvelles bandes d'absorption, mais les raies y sont plus marquées et plus larges qu'ailleurs, ce qui prouve nettement que les portions obscures à la surface de Jupiter sont plus profondes que les portions avoisinantes. La lumière solaire pénètre plus profondément, en ces endroits-là, dans l'atmosphère de la planète et y subit une altération plus marquée. Cette remarque vient à l'appui de l'opinion généralement admise que les bandes brillantes sont des amas opaques de nuages. »

§ 4. LES SATELLITES DE JUPITER.

C'est un spectacle merveilleux, quand on observe Jupiter avec une lunette d'une suffisante puissance, que de voir le magnifique globe de la planète entouré de quatre très-petites étoiles



Fig 158. Jupiter accompagné de ses quatre satellites.

qui en sont les satellites. « Non-seulement de nuit en nuit, dit Webb, mais d'heure en heure, on a les yeux charmés par leurs mouvements incessants; leurs orbites se croisent en avant ou

en arrière ; et ces planètes en miniature s'atteignent, se dépassent, se réunissent, se cachent et s'éloignent les unes des autres en formant le plus curieux et le plus interminable dédale. »

C'est à Galilée (7 janvier 1610) qu'on doit la découverte des quatre satellites de Jupiter, et la première détermination

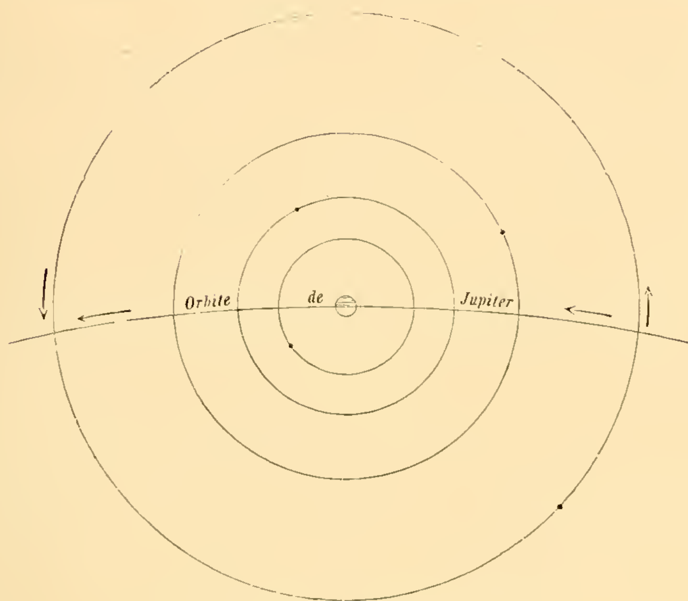


Fig. 159. Orbites des satellites de Jupiter.

des durées de leurs révolutions autour de la planète centrale. Invisibles à l'œil nu[1], ils apparaissent dans une lunette de faible

1. La visibilité à l'œil nu des satellites de Jupiter, du 3e surtout, le plus lumineux, est un fait établi aujourd'hui, mais seulement pour des vues exceptionnelles, et dans les plus favorables circonstances. C'est surtout l'éclat et le voisinage de Jupiter qui rendent ce genre d'observation difficile; en masquant la planète, ou en éteignant artificiellement les rayons divergents qui font surtout de Jupiter une fausse lumière où sont noyés d'aussi faibles points lumineux, beaucoup de personnes arriveraient à les distinguer à l'œil nu. (Voyez sur ce point Arago, *Astronomie populaire*, I et IV ; et Webb, *Celestial objects for common telescopes*.)

Les satellites de Jupiter suivent, dans leurs mouvements, les lois qui régissent les mouvements planétaires. L'analogie de ce système en miniature avec le système solaire n'a pas peu contribué, dès qu'il fut connu, au

puissance comme de petites étoiles qui oscillent de part et d'autre du disque de Jupiter, le plus gros d'entre eux ayant à peu près l'éclat d'une étoile de sixième grandeur.

Les orbites que décrivent les satellites sont des courbes peu différentes du cercle et dont les plans n'ont qu'une très-faible inclinaison sur l'équateur de Jupiter. Voici, avec les noms mythologiques sous lesquels on les désigne quelquefois, quelles sont les durées des révolutions et les distances des satellites au centre de la planète :

	DURÉES DES RÉVOLUTIONS	
	en jours moyens.	en jours de Jupiter.
Ier satellite. Io.	1j 18h 27m 33s	4jj.2756
IIe — . Europa	3 13 14 36	8 .5825
IIIe — . Ganymède. . . .	7 3 42 33	17 .2912
IVe — . Callisto	16 16 31 50	40 .4265

	DISTANCES DES SATELLITES AU CENTRE DE JUPITER	
	en rayons de la planète.	en kilomètres.
Ier satellite. Io.	6.049	430 000k
IIe — . Europa	9.623	682 000
IIIe — . Ganymède	15.350	1 088 000
IVe — . Callisto	26.998	1 914 000

Ces distances sont relatives aux centres des satellites et de Jupiter, de sorte que, pour avoir les distances aux points les plus voisins de leurs surfaces, il faudrait, des nombres précédents, retrancher la somme des rayons de chaque satellite et

succès de la doctrine copernicienne. Mais on a été plus loin, et des observations précises et prolongées ont fourni des notions exactes sur les éléments des orbites, sur leurs variations, sur les inégalités qui troublent leurs mouvements elliptiques. Si l'on songe aux actions réciproques de ces corps sur eux-mêmes et sur Jupiter, et si on les compare à celles du système autrement simple de la Terre et de la Lune, on n'est point étonné que Laplace ait dit que les inégalités dont nous parlons « rendent leur théorie fort compliquée ».

Bornons-nous à dire que l'ellipticité des orbites du 1er et du 4e satellite est insensible, celle du 3e très-faible, et que l'orbite du 4e a seule une excentricité notable.

de Jupiter, ce qui les diminuerait chacune, à peu de chose près, de 72000 kilomètres.

En raison de la faible inclinaison des plans de leurs orbites sur le plan de l'orbite de Jupiter, les trois premiers satellites passent, à chacune de leurs révolutions, dans le cône d'ombre que la planète projette à l'opposé du Soleil[1]. Il en résulte une éclipse de Soleil pour chacun de ces corps, et, pour Jupiter comme pour la Terre, une éclipse du satellite immergé dans l'ombre. En outre, suivant les positions différentes de Jupiter et de la Terre relativement au Soleil, il arrive que les satellites, même avant leur immersion dans l'ombre, même après leur sortie, sont occultés par le disque de Jupiter. C'est ce qui a toujours lieu pour les deux premiers satellites, de sorte qu'on ne peut jamais, de la Terre, observer que leur émersion ou leur immersion ; tandis que le troisième et le quatrième disparaissent et reparaissent quelquefois du même côté du disque. Quant au satellite le plus éloigné, sa distance et l'inclinaison plus grande de son orbite sont cause qu'il passe assez fréquemment au-dessus du cône d'ombre, ou n'y plonge qu'en partie. Ses éclipses n'ont donc pas lieu à chacune de ses révolutions autour de Jupiter.

Il existe entre les mouvements des trois premiers satellites un rapport particulier[2], d'où résulte cette conséquence, constatée d'ailleurs par les observations, que les trois satellites les plus voisins de Jupiter ne peuvent subir d'éclipses simulta-

1. L'ombre projetée par Jupiter forme un cône (cône non circulaire, vu l'ellipticité prononcée du globe), dont la longueur n'est pas moindre de 89 millions de kilomètres (0.6 de la distance 1). La section de ce cône, à la distance du satellite le plus éloigné, a un rayon dont les dimensions apparentes dépassent à peine 2°; mais à la distance du premier satellite, ce rayon soustend environ 19°. Or, l'inclinaison des orbites des deux premiers satellites sur l'équateur de Jupiter étant à peu près nulle, leur inclinaison sur le plan de l'orbite n'atteint guère que 4°; ils pénètrent donc toujours dans le cône d'ombre, tandis que le IV[e] peut passer au-dessus ou au-dessous dans certaines circonstances.

2. Voyez Laplace, *Exposition du système du monde*, 6[e] édition, p. 132.

nées : quand le second et le troisième sont éclipsés en même temps, le premier est en conjonction avec la planète; si tous deux passent au-devant de Jupiter, de façon à produire pour celui-ci des éclipses de Soleil simultanées, le premier satellite se trouve en opposition, c'est-à-dire éclipsé lui-même. La circonstance que nous venons de rappeler ne s'applique d'ailleurs qu'aux éclipses réelles des satellites, c'est-à-dire à leurs pas-



Fig. 160. Jupiter sans satellites, le 21 août 1867. Positions des satellites relativement au rayon visuel mené de la Terre.

sages dans le cône d'ombre, et non pas aux simples occultations par le disque, occultations qui suffisent à les faire disparaître aux yeux des observateurs placés à la surface de la Terre.

Il arrive quelquefois que les quatre satellites disparaissent à la fois pour nous, les uns étant éclipsés ou occultés, les autres se trouvant projetés sur le disque lumineux de Jupiter. Cette circonstance s'est présentée dans la nuit du 21 au 22 août 1867, quatre jours avant l'opposition : de $10^h\ 13^m$ à 11

58^m (temps moyen de Paris) la planète a paru complétement privée de ses compagnons ; le premier, le troisième et le quatrième satellite étaient tous trois en avant du disque avec lequel ils se confondaient, et le deuxième se trouvait éclipsé par son passage dans le cône d'ombre de Jupiter. La figure 160 rend compte de ce phénomène, assez rare d'ailleurs [1].

§ 5. CONSTITUTION PHYSIQUE DES SATELLITES.

De la Terre, les satellites de Jupiter sont aperçus comme de bien petites étoiles, dont l'éclat, du reste, n'est pas constant, ainsi qu'on va le voir. Mais, vus de la planète, ce sont des astres qui rivalisent pour le moins, en importance, avec notre Lune. Struve, en effet, a mesuré leurs dimensions apparentes moyennes, et a trouvé des nombres qui indiquent des dimensions réelles fort remarquables. En voici le tableau :

Satellites.	Dimensions apparentes [2]	Dimensions réelles du diamètre		Volume.
—		Terre = 1	en kilomètres.	Terre = 1.
I	1″.015	0.2975	3800	0.026
II.	0″.911	0.2670	3400	0.019
III	1. 488	0.4362	5570	0.083
IV	1″.293	0.3790	4840	0.054

Le IIIe satellite, le plus lumineux des quatre, est aussi, comme on voit, le plus volumineux ; il vaut plus de quatre

1. Des observations analogues ont été faites, le 2 novembre 1681, par Molineux ; le 23 mai 1802, par W. Herschel ; le 15 avril 1826, par Wallis ; le 27 septembre 1843, par Griesbach.

2. Ces dimensions apparentes sont rapportées à la distance moyenne de Jupiter à la Terre. Secchi a trouvé des nombres un peu différents, que voici :

I, 0″.985 ; II, 1″.054 ; III, 1.609 ; IV, 1.496.

L'ordre de grandeur est alors III, IV, II, I, au lieu de III, IV. I, II d'après les mesures de Struve, qui, nous devons l'ajouter, s'accordent avec

fois notre Lune, dépasse des deux tiers le volume de Mercure et équivaut à plus de moitié de la planète de Mars. Le quatrième satellite a le même volume que Mercure, et le Ier et le IIe sont tous deux plus gros que la Lune. Pallas, qui est la plus grosse des planètes télescopiques, n'a pas un diamètre de 1000 kilomètres, et dès lors son volume est à peine la quarantième partie du plus petit des satellites de Jupiter.

Nous venons de parler de l'aspect des satellites vus de Jupiter. Leurs diamètres apparents, vus du centre de la planète, soustendent des angles de 30′, 17′, 14′ et 9′ : ce sont à peu



Fig. 161. Grosseurs des satellites de Jupiter comparées à celles de la Terre et de la Lune.

près ceux des satellites supposés à l'horizon. Mais ces dimensions apparentes deviennent notablement plus grandes, pour les points de Jupiter qui voient passer les satellites à leur zénith : le Ier satellite a dans ce cas un diamètre de 35′ environ, notablement plus grand que celui de la Lune ; celui du IIe mesure 19′, du IIIe 15′ et du IVe enfin 9′. D'après ce que nous avons dit plus haut, trois d'entre eux peuvent être à la fois en vue sur le même horizon, donnant par la diversité de leurs phases, de leur couleur et de leur lumière, de leurs fréquentes

les évaluations de W. Herschel. On conçoit des différences de cet ordre pour des appréciations aussi délicates de disques lumineux fort petits, et dont l'éclat varie selon l'époque des observations.

éclipses, le spectacle le plus varié dans le ciel des nuits de Jupiter. Leur mouvement propre y est extrêmement rapide; en un jour jovien, le Ier satellite ne décrit pas moins de 84°, le IIe de 42°, le IIIe de 20°, le IVe enfin de 9°, en sens contraire du mouvement diurne; et comme ce jour ne dure pas 10 heures, on voit combien de tels mouvements sont plus rapides que celui de la Lune; les variations des phases s'y accomplissent en conséquence avec une pareille vitesse.

	Diamètres apparents vus de Jupiter.	Diamètres réels. Jupiter = 1.	Volumes. Jupiter = 1.
Ier.	30′ 20″	0.027	0.000020
IIe.	17′ 10″	0.024	0.000014
IIIe	14′ »	0.040	0.000060
IVe	8′ 40″	0.034	0.000039

Le tableau qu'on vient de lire résume les dimensions apparentes et réelles des satellites vus de Jupiter ou comparés à la planète. Il y faut ajouter ce qu'on sait des masses de ces petits corps; elles sont, en millionièmes de la masse de Jupiter, 17, 23, 88 et 43, de sorte que, toutes réunies, elles forment un peu moins de la 6000e partie de la première, la seizième partie de celle de la Terre. Comme leurs volumes réunis ne donnent que la 7600e partie du volume de Jupiter, leur densité est un peu plus forte que la sienne. Tous ces éléments, du reste, ne sont connus qu'approximativement: les mesures les plus rigoureuses laissent toujours des incertitudes, quand il s'agit d'objets aussi petits et aussi éloignés.

Passons maintenant à un autre ordre de recherches.

Les satellites de Jupiter, outre leur mouvement de circulation autour de la planète principale, ont-ils un mouvement de rotation? Au point de vue des principes de mécanique, et aussi par voie d'analogie, on aurait pu répondre *a priori* affirmativement. Mais il y a des probabilités plus positives, parce qu'elles résultent de faits observés.

La première mention de ce mouvement de rotation que

nous connaissions, se trouve dans les *Éléments d'astronomie* de Cassini II. Ce savant faisait observer que les satellites, en passant sur le disque, ont quelquefois une moindre dimension que leurs ombres; hors du disque, leur éclat est variable; le IIIe paraît tantôt plus grand que les deux premiers, quelquefois seulement égal. Il explique ces variations par l'existence de taches obscures qui tantôt se trouvent dans l'hémisphère tourné vers la Terre, tantôt dans l'hémisphère opposé, ce qui est un témoignage de leur mouvement autour d'un axe.

W. Herschel, en étudiant ces variations, qu'il attribue, comme Cassini, aux taches plus ou moins réfléchissantes de la surface, a cru reconnaître que le maximum et le minimum d'éclat, pour chaque satellite, se reproduisent toujours vers les mêmes régions des orbites[1], et il en conclut que, de même que la Lune, les satellites de Jupiter tournent sur eux-mêmes, dans un temps égal à celui de leur révolution autour de la planète[2]. Ces conclusions ont été contestées en ce qui concerne le IIIe satellite : Secchi, ayant observé ce satellite en août et septembre 1855, a vu sur sa surface des taches qui ont varié en quelques heures de forme et de position (fig. 162) et qui indiquent un mouvement de rotation beaucoup plus rapide que celui de la révolution. Il reste d'ailleurs toujours à savoir si les taches obscures qui déterminent des variations d'éclat sont des taches permanentes, ou des accidents

1. « Le Ier satellite est celui qui éprouve ces changements au plus haut degré. Il est au milieu de son maximum d'éclat, quand il atteint le point de l'orbite à peu près milieu entre la plus grande digression orientale et la conjonction. La face la plus brillante du second satellite regarde aussi la Terre, quand ce petit astre est entre la plus grande élongation orientale et la conjonction. Pour le IIIe satellite, il a deux maxima d'éclats et ils s'observent aux deux élongations. Le IVe ne brille d'une vive lumière qu'un peu avant et un peu après l'opposition. »

2. « Maraldi avait déjà conclu ce résultat, pour le IVe satellite, des retours d'une même tache observée sur son disque, dans ses passages sur la planète. »

variables de l'atmosphère des satellites. C'est une question délicate, difficile à élucider; outre les variations d'éclat, on constate aussi des différences de coloration dans leur lumière, et il est bien difficile de décider si ces différences sont dues aux appréciations des observateurs, à la nature de leurs instruments, ou à des changements physiques réels.

W. Herschel (1797) a trouvé que le Ier satellite a une teinte d'un blanc plus ou moins vif; Beer et Mædler le trouvaient

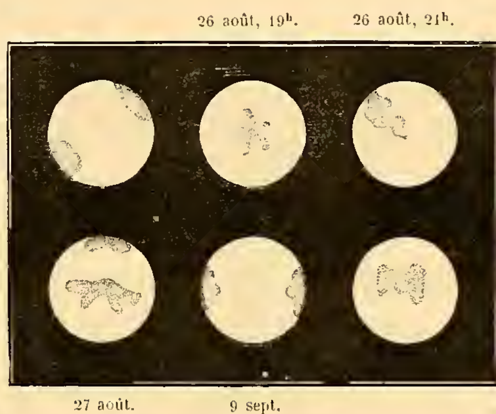


Fig. 162. Taches du IIIe satellite, observées en 1855, par Secchi.

bleuâtre, et c'est aussi cette couleur que lui assigne M. Klein (1867).

Le IIe est tantôt blanc pur, tantôt blanc cendré, tantôt blanc bleuâtre, selon W. Herschel; Beer et Mædler l'ont vu jaunâtre, et Klein, bleu. Le IIIe, blanc selon le premier observateur, jaunâtre suivant les seconds, est regardé par Secchi comme généralement rouge, tantôt rouge, tantôt orange par Klein. Enfin, le IVe satellite, le moins lumineux, a été vu d'un rouge sombre ou rougeâtre par tous les observateurs, sauf par Beer et Mædler qui lui assignaient une teinte bleue.

Les passages des satellites, en avant de Jupiter, quand ils se projettent pour nous sur le disque, ceux de leurs ombres qu'on aperçoit tantôt à droite, tantôt à gauche, selon les positions respectives de la Terre, de Jupiter et du Soleil, et

qui se voient quelquefois seules, quelquefois simultanément avec les satellites eux-mêmes, ont aussi présenté des particularités d'un grand intérêt, soit pour Jupiter, soit pour les petits corps qui l'accompagnent. Citons quelques-uns de ces phénomènes.

Quand les satellites sont visibles sur le disque[1], on les voit ordinairement comme de petites taches rondes, faiblement plus lumineuses que la partie de Jupiter sur laquelle ils se détachent, et d'un éclat variable selon qu'ils traversent une

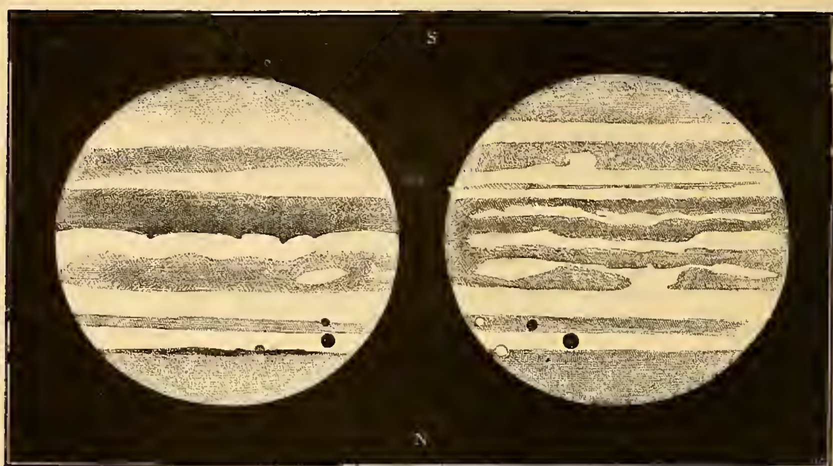


Fig. 163. Passage des IIe et IIIe satellites sur le disque, le 25 mars 1874, d'après M. Knobel.

bande obscure ou une zone brillante. Le plus souvent le satellite est visible seulement sur les bords du disque ; en approchant des parties centrales, plus brillantes, il s'évanouit pour reparaître au bord occidental. D'autres fois, il se détache sur Jupiter, comme une tache sombre. M. Dawes cite un fait de ce genre très-significatif. En août 1867, observant *Jupiter sans satellites*, le Ier, le IIIe et le IVe se projetant sur le disque, ce savant vit leurs ombres parfaitement noires; mais le

1. C'est à Cassini, puis à Maraldi qu'on doit les premières observations de ce genre.

IVe satellite lui-même était si sombre qu'il ne put distinguer lequel l'était le plus, de lui ou de son ombre. Même observation de M. Lassell, le 30 décembre 1871 (voy. fig. 157).

Le 25 mars 1874, une observation analogue a été faite à la fois, à Paris par M. Flammarion, à Louvain par M. Terby, et à Burton on Trent par M. Knobel, dont nous reproduisons les dessins. A 8^h 30^m, on voyait l'une au-dessus de l'autre les ombres noires des satellites II et III (l'une d'elles a paru grise à M. Terby). Le premier était invisible, et le second paraissait comme une tache sombre se détachant à peine d'une bande mince grisâtre, et plus petite que l'ombre. Une heure et demie plus tard, à 10^h 0^m, les deux satellites se voyaient près du bord occidental suivis de leurs ombres. Chose curieuse, le IIIe est blanc, bien que se projetant alors sur une partie de la bande plus claire qu'au milieu. Comment expliquer cette anomalie?

Le IVe satellite est celui qui a présenté les plus grandes singularités d'aspect. Il paraît souvent fort irrégulier, de forme polygonale. Il en est de même de l'ombre. La forme ovale de celle-ci a suggéré à M. Burton l'opinion qu'il y avait là un effet dû à l'absorption de la lumière au sein de l'atmosphère de Jupiter. Le cône ou le cylindre d'ombre projeté par un satellite pénètre dans cette atmosphère; mais comme l'espace ainsi obscurci est vu de la Terre sous une certaine obliquité, il doit y avoir de part et d'autre une moindre épaisseur d'ombre, et par suite deux segments moins sombres qui donnent à la partie entièrement noire de la tache une forme ovale, comme le constate l'observation. D'une analyse des circonstances et des faits, M. Burton a cru pouvoir déduire la profondeur à laquelle le cône d'ombre d'un satellite pénètre dans l'atmosphère de Jupiter; il a trouvé qu'elle variait entre 3200 et 9200 milles (de 5000 à 15 000 kilomètres environ).

VIII

SATURNE ♄.

§ 1. ÉLÉMENTS DE L'ORBITE DE SATURNE. — DISTANCES AU SOLEIL ET A LA TERRE.

Si Jupiter est la plus grosse des planètes du monde solaire, Saturne est le plus riche des systèmes secondaires dont ce monde se compose. Ce n'est plus seulement de quatre, mais bien de huit satellites que la planète centrale est entourée, et si les évolutions de ces huit lunes ne donnent pas lieu à des éclipses aussi fréquentes que dans Jupiter, les habitants de Saturne jouissent d'un spectacle bien autrement étrange, et probablement unique dans le système planétaire : je veux parler des anneaux qui environnent à distance le globe central en circulant sans cesse autour de lui. Avant de décrire, avec les détails qu'ils méritent, les anneaux de Saturne, entrons dans quelques détails sur les éléments astronomiques et physiques de la planète elle-même.

Saturne, vu à l'œil nu, a l'aspect d'une étoile de première grandeur, mais d'un éclat moins intense que Jupiter ; sa lumière n'est pas scintillante. Son mouvement apparent sur la voûte étoilée, beaucoup plus lent que celui des deux planètes supérieures que nous venons de décrire (Saturne, en sanscrit, se nomme « Sanaistschara », *qui se meut lentement*), offre

du reste les mêmes alternatives ; tantôt il est direct, tantôt il est rétrograde, tantôt il est nul, et alors Saturne paraît stationnaire au milieu des étoiles. Tous les 378 jours en moyenne, la planète se trouve dans une même situation relativement à la Terre et au Soleil : c'est la durée de sa révolution synodique, qui d'ailleurs se divise en deux parties : l'une de 239 jours environ, consacrée au mouvement direct d'Occident en Orient; l'autre de 139 jours, que Saturne met à parcourir son arc rétrograde, d'Orient en Occident. Il est inutile d'entrer de nouveau dans l'explication de ces apparences.

La révolution sidérale de Saturne a une durée de $10759^{jm}.22$, ou de 29 ans et 167 jours. C'est le temps qu'il lui faut pour parcourir l'orbite qu'il décrit autour du Soleil, dans un plan incliné de $2^{\circ}\,30'$ sur le plan de l'orbite terrestre. Cette immense courbe n'a pas un développement moindre de 8 milliards 860 millions de kilomètres, ou 2 milliards 215 millions de lieues, de sorte que Saturne se meut avec une vitesse moyenne de translation d'environ 9 kilomètres et demi par seconde, vitesse trois fois moindre que celle de la Terre. Du reste, cette vitesse varie, parce que l'orbite n'étant pas circulaire, mais elliptique, les distances de Saturne au Soleil sont variables elles-mêmes, et que nous avons vu que le mouvement d'une planète est d'autant plus rapide qu'elle se rapproche plus du foyer de l'attraction. L'excentricité de l'orbite est égale au nombre 0.056, c'est-à-dire plus que triple de celle de l'orbite terrestre, et la distance moyenne de la planète au Soleil vaut environ neuf fois et demie celle de notre Terre au même astre.

Voici d'ailleurs les distances de Saturne au Soleil, exprimées en rayons moyens de l'orbite de la Terre et en millions de kilomètres :

	Distance de la Terre au Soleil = 1.0000	Millions de kilomètres.
Distance périhélie	9.0046	1 330
— moyenne	9.5388	1 411
— aphélie.	10.0730	1 490

Il y a, comme on voit, une différence d'environ 160 millions de kilomètres ou 40 millions de lieues entre les distances de la planète au Soleil, quand elle occupe, à près de quinze ans d'intervalle, les deux positions opposées situées aux extrémités du grand axe de son orbite : cette différence surpasse la distance même du Soleil à la Terre. Le disque solaire, vu de Saturne, n'a plus qu'un diamètre moyen de 3′ 20″, et sa surface est réduite à la 90e partie de celle sous laquelle nous le voyons nous-mêmes. C'est donc dans cette proportion que sont affaiblies les radiations caloriques et lumineuses de l'astre, quand elles parviennent à la surface de Saturne.

Les distances de Saturne à la Terre varient naturellement selon les positions respectives des deux planètes sur leurs orbites. A l'époque de l'opposition, elles sont les plus petites possible, puisque alors la Terre est entre Saturne et le Soleil ; elles atteignent au contraire leurs valeurs maxima à l'époque de la conjonction : l'excentricité des orbites, l'inclinaison de leurs plans rendent d'ailleurs ces distances extrêmes variables elles-mêmes. Bornons-nous donc à dire qu'actuellement, c'est quand Saturne se trouve en opposition en décembre, qu'il se rapproche le plus de nous : sa distance à la Terre est alors d'environ 296 millions de lieues. Quand la conjonction tombe en juin, cette distance atteint et même dépasse 400 millions de lieues, de sorte qu'il n'y a pas moins de 100 millions de lieues de différence entre les distances extrêmes.

Il résulte de ces variations de distance des changements inverses dans l'éclat de Saturne vu à l'œil nu, et, quand on l'examine à l'aide de lunettes assez puissantes pour faire voir son disque nettement limité, des variations correspondantes dans les dimensions de son diamètre apparent : à sa distance moyenne au Soleil ou à la Terre, le diamètre de Saturne mesure 17″.5 ; son maximum atteint 20″ et son minimum descend à 15″. La figure 107 donne une idée exacte de ces variations.

Le disque de Saturne, comme celui de Jupiter et pour les mêmes raisons, se montre toujours entièrement éclairé, sans qu'on y puisse distinguer aucune phase ; mais les ombres noires que projettent ses satellites en passant au-devant de lui, et celle que porte l'anneau sur son globe, ne laissent aucun doute

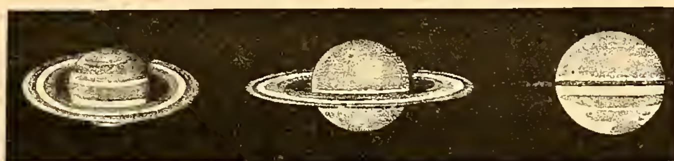


Fig. 164. Dimensions apparentes de Saturne vu de la Terre, à ses distances extrêmes et à sa distance moyenne.

relativement à l'origine de sa lumière. Comme tous les autres globes planétaires, le globe de Saturne est opaque et l'éclat dont il brille est emprunté au Soleil.

Sa forme est très-sensiblement elliptique, c'est-à-dire aplatie aux extrémités d'un même diamètre, qui sont précisément les deux pôles de rotation. Des mesures faites par W. Herschel, en 1805, avaient même fait penser que la figure du globe de Saturne n'était pas régulière, et que son plus grand diamètre était celui qui aboutissait à 45°, à égale distance entre l'équateur et les pôles; mais Bessel a prouvé que l'attraction réciproque du globe et de l'anneau ne pouvait avoir donné lieu à cette forme singulière, comme Herschel l'avait supposé. Toutefois la régularité de la forme ellipsoïdale du globe de Saturne ne nous paraît rien moins que prouvée. Il suffit, pour justifier le doute sur ce point, de parcourir la belle série d'observations et de dessins que le regretté directeur de l'obser-

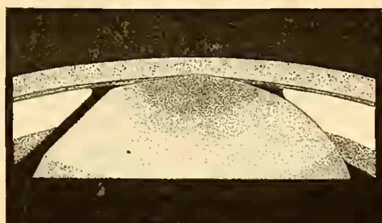


Fig. 165. Forme polygonale du globe de Saturne d'après G. P. Bond.

vatoire d'Harvard College a publiée il y a vingt ans, et dont nous reproduisons un échantillon qui nous paraît caractéristique. Le globe s'y montre plutôt polygonal que sphéroïdal, et les remarques de l'observateur, consignées dans le texte de son Mémoire, prouvent que ces irrégularités de forme ne provenaient point d'une imperfection de dessin. Dans plusieurs autres dessins, les régions polaires de Saturne affectent plutôt une forme allongée, en pain de sucre, qu'une forme aplatie. Peut-être un jour la photographie parviendra à obtenir des épreuves assez fidèles pour mettre en évidence cette configuration singulière qui trouverait peut-être, malgré les travaux de Bessel, son explication dans l'action des anneaux et des satellites sur une masse fluide et peu dense.

La différence des diamètres équatorial et polaire n'en est pas moins certaine[1], et l'ellipticité paraît comprise entre $\frac{1}{9}$ et $\frac{1}{10}$; c'est le plus considérable de tous les aplatissements connus des sphéroïdes planétaires.

Les dimensions réelles de Saturne se déduisent de son diamètre apparent et de sa distance. Son diamètre équatorial est plus de neuf fois et demie le diamètre équatorial de la Terre (9.937; le diamètre polaire est 8.925). Le rayon de

1. Herschel a soupçonné dès 1776 la différence du rayon équatorial et du rayon polaire que Lalande, en 1789, considérait encore comme insensible, et que l'astronome de Slough mesurait la même année. Voici, d'après diverses autorités, les valeurs de ces diamètres apparents à la distance moyenne, et l'aplatissement correspondant de Saturne :

	Diam. éq.	Diam. pol.	Aplatiss.
W. Herschel (1789).	22″.8	20″.6	$\frac{1}{10.4}$
Bessel (1838)	17″.053	15″.381	$\frac{1}{10.2}$
Main	18″.676	16″.601	$\frac{1}{9.01}$
Arago (1847)	17″.698	15″.766	$\frac{1}{9.16}$
G. P. Bond (1848)	—	—	$\frac{1}{9.3}$

Biot, en reproduisant une partie de ces documents, donne des aplatissements plus forts : c'est qu'il rapporte la différence des deux axes, non au grand axe ou diamètre équatorial, mais au plus petit.

Saturne vaut environ 61 000 kilomètres ou 15 250 lieues, ce qui fait 382 000 kilomètres ou 99 500 lieues pour le développement de la circonférence de son équateur. La dépression polaire n'est pas inférieure à 6900 kilomètres.

La surface de Saturne vaut 80 fois la surface du globe terrestre ; son volume est 674.5 fois aussi grand que celui de la Terre ; il vaut donc environ la 1850me partie du volume du

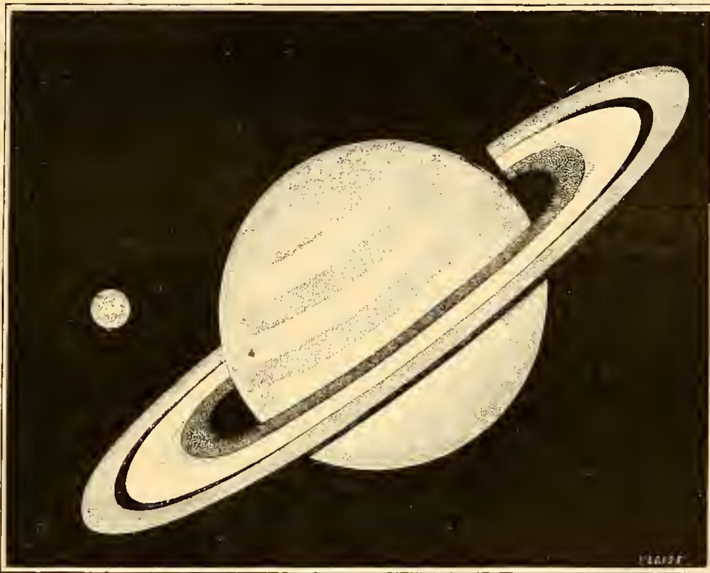


Fig. 166. Saturne et la Terre ; dimensions comparées.

Soleil, ou les 3/5 du volume de Jupiter. Mais sa masse est proportionnellement beaucoup plus petite : elle n'est guère que la 3500me partie de la masse du Soleil, par conséquent 92 fois seulement la masse de la Terre. Il en résulte pour la densité moyenne de la matière qui compose le globe de Saturne, un nombre assez faible, égal à 0.133, quand on prend la densité du globe terrestre pour unité : c'est un peu moins des trois quarts de la densité de l'eau ; le potassium parmi les métaux ; certains bois, comme le cyprès, l'érable, l'olivier, ont

des densités voisines de celle de Saturne. Peut-être le globe de Saturne est-il entièrement liquide, ou encore est-il formé d'un noyau solide enveloppé de couches épaisses, liquides et même gazeuses. On n'a pas de données positives qui permettent de se prononcer sur des hypothèses aussi conjecturales : on sait seulement, d'après la valeur observée de la dépression polaire, que le globe de Saturne n'est point homogène ; comme dans Jupiter, la densité des couches va en croissant de la surface au centre. La pesanteur à la surface de la planète surpasse d'un dixième environ l'intensité de la pesanteur à la surface de la Terre. Un corps qui tombe y parcourrait donc, dans le vide, pendant la première seconde de la chute, $5^{m}.40$, et au bout de ce temps, sa vitesse acquise serait double, soit $10^{m}.80$.

§ 2. MOUVEMENT DE ROTATION DE SATURNE. — LES JOURS ET LES NUITS; LES SAISONS.

En observant le disque de Saturne avec un télescope d'une grande puissance, on voit qu'il est sillonné de bandes parallèles à la direction de son équateur, les unes blanches, les autres plus ou moins sombres, et d'une couleur grise, jaunâtre ou blanchâtre. W. Herschel, en étudiant, vers 1794, quelques irrégularités que présentaient ces bandes, et en suivant leurs déplacements sur le disque, a reconnu que la planète était animée d'un mouvement de rotation, et il a évalué à 10 heures un quart, environ, la durée de ce mouvement. Depuis, de nouvelles déterminations ont permis d'obtenir cette durée avec plus de précision, et on la fixe à 10 heures 29 minutes 27 secondes. L'axe de rotation est incliné de 64°18′ sur le plan de l'orbite. Grâce à ces données, on peut se faire une idée des conditions climatologiques des diverses régions de Saturne, en les partageant, comme les régions terrestres, en

zones tropicales, tempérées et polaires. A l'équateur se succèdent sans interruption des jours et des nuits de cinq heures, pendant la longue année de la planète qui ne comprend pas moins de 24 630 jours solaires saturniens. De l'équateur aux cercles polaires, les jours et les nuits, de plus en plus inégaux, ne dépassent pas cependant 10 heures 1/2 de durée; mais dans les régions polaires cette inégalité va croissant rapidement jusqu'aux pôles, où le Soleil, après un séjour de 14 ans et 8 mois, disparaît totalement pour une période aussi longue. L'excentricité de l'orbite de Saturne, et surtout l'inclinaison de son axe, produisent des variations considérables dans l'intensité de la lumière et de la chaleur reçues aux diverses latitudes; ses longues saisons, dont chacune dure en moyenne plus de sept de nos années, ne ressemblent donc en rien aux saisons, si uniformes, si peu variées, de Jupiter.

§ 3. LES ANNEAUX DE SATURNE.

Pendant l'été de 1610, Galilée ayant tourné vers Saturne la lunette qu'il avait inventée tout récemment, fut bien surpris de l'aspect sous lequel il voyait la planète : au lieu d'une étoile, il en distinguait trois; « Saturne, comme il le disait dans une lettre au grand-duc de Toscane, lui paraissait *tricorps.* » Voici en quels termes, dans une autre lettre du 13 novembre de la même année, adressée à Julien de Médicis, il faisait part à ce dernier de cette singulière découverte : « Lorsque j'observe Saturne, y dit-il, avec une lunette d'un pouvoir amplificatif de plus de trente fois, l'étoile centrale paraît la plus grande; les deux autres, situées l'une à l'Orient, l'autre à l'Occident, et sur une ligne qui ne coïncide pas avec la direction du zodiaque, semblent la toucher. Ce sont comme deux serviteurs qui aident le vieux Saturne à faire son chemin et restent toujours à ses côtés. Avec une lunette de moindre

grossissement, l'étoile paraît allongée et de la forme d'une olive. » En continuant ses observations, Galilée vit avec étonnement les prétendues étoiles latérales diminuer de grandeur ; elles s'affaiblirent de plus en plus, et enfin, vers la fin de novembre 1612, elles avaient l'une et l'autre disparu complétement : le globe de Saturne était devenu isolé et parfaitement rond. L'illustre astronome considéra ses précédentes observa-





Anciens dessins de Saturne, d'après Gassendi.

Fig 167. Saturne tricorps, 19 juin 1633. Fig. 168. Observation du 11 janvier 1645

tions comme autant d'illusions d'optique. A partir de cette époque, il ne s'occupa plus de Saturne.

Cependant les mêmes phénomènes reparurent au bout d'un certain temps ; d'autres observateurs, parmi lesquels Gassendi et Hévélius, les revirent ; mais les lunettes trop imparfaites encore ne laissèrent longtemps rien deviner de leur véritable nature, et ce n'est qu'en 1655 qu'Huygens, ayant observé longuement Saturne avec un télescope construit par lui-même, parvint à déchiffrer le mot de l'énigme[1].

1. Gassendi, comme Galilée, voyait Saturne triple ; Hévélius reliant les deux petites étoiles à la grande, déclarait ne rien comprendre à ces deux bras de Saturne. D'après le P. Riccioli, Saturne était environné d'une armille mince, plane, elliptique, adhérente à la planète en deux points. D'autres enfin croyaient que la figure particulière de Saturne, nous présentant successivement des faces différentes, suffisait à expliquer la diversité des aspects sous lesquels la planète s'était successivement montrée aux divers observa-

Huygens soutint et prouva, en effet, que la série des apparences singulières que présentait Saturne dans la suite des années, s'expliquait de la façon la plus simple en admettant que son globe est entouré à distance par un anneau opaque très-mince, de forme circulaire, qui ne touche d'aucun côté à la planète, et qui l'accompagne dans son mouvement de translation autour du Soleil, en restant toujours parallèle à lui-même, de manière à couper l'écliptique sous un angle

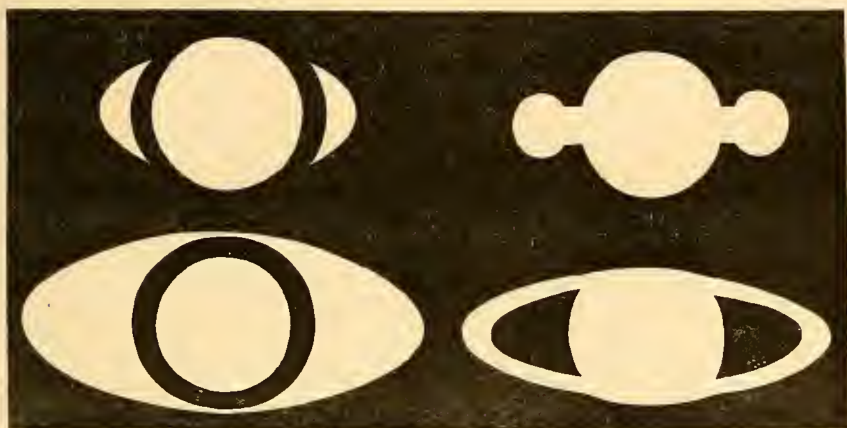


Fig. 169. Anciens dessins de Saturne, d'après Gassendi et Huygens.

d'environ 30 degrés. Selon les positions relatives de Saturne et de la Terre sur leurs orbites, l'appendice annulaire nous

teurs. On se rendra compte des écarts singuliers où était tombée l'imagination des savants, en examinant quelques-unes de ces figures, recueillies par Gassendi et par Huygens (fig. 167, 168 et 169). Hévélius distinguait encore, en 1656, six phases différentes de Saturne, et croyait utile de leur appliquer cette bizarre nomenclature :

Saturnus monosphericus,
— trisphericus,
— spherico-cuspidatus.

Saturnus spherico-ansatus,
— elliptico-ansatus-diminutus,
— elliptico-ansatus-plenus.

Huygens, par la publication de son *Systema Saturnium* (1659), mit fin à ces visions, et donna l'explication rationnelle de toutes ces apparences.

montre toujours celle de ses faces qui est éclairée par le Soleil, mais sous des inclinaisons variables, qui atteignent deux maxima et deux minima dans le cours de chacune des révolutions de Saturne. C'est un effet de perspective céleste que font aisément comprendre les figures 170 et 171. La première figure l'orbite de Saturne et celle de la Terre vues en perspective sur le même plan, c'est-à-dire abstraction faite de leur faible inclinaison mutuelle de 2° 29'. Le plan de l'anneau

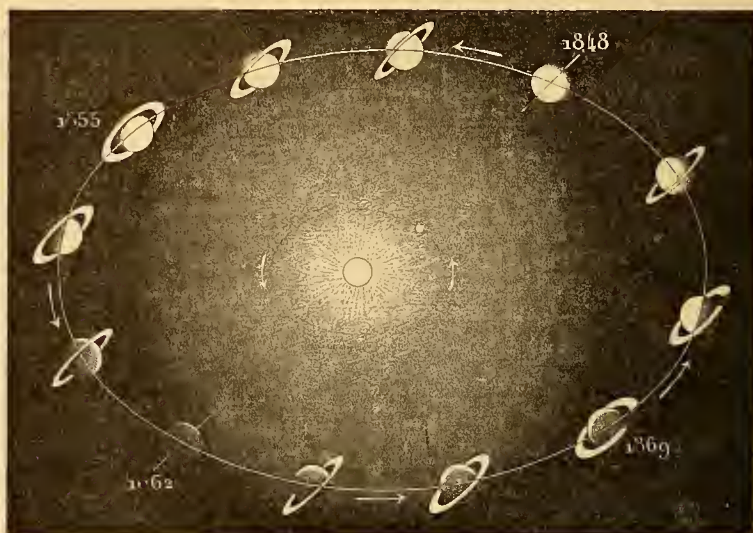


Fig. 170. Phases des anneaux de Saturne. Vue perspective des différents aspects.

restant parallèle à lui-même, il en est de même de sa trace sur le plan de l'orbite. Il résulte évidemment de là, qu'en deux positions diamétralement opposées de la planète sur son orbite, la trace en question devra passer précisément par le centre du Soleil. A l'une ou à l'autre de ces époques, la lumière solaire n'éclairera ni l'une ni l'autre des deux faces de l'anneau, mais seulement sa tranche qui est relativement fort mince. De la Terre, on ne verra donc plus d'appendice annulaire : Saturne paraîtra rond ; et c'est précisément ce qui arriva en novembre 1612, quand Galilée vit avec découragement

disparaître toute apparence lumineuse latérale. Tout au plus, grâce aux instruments puissants de notre époque, peut-on distinguer alors sur le globe lumineux une légère ligne obscure, qui n'est autre que la portion de la face obscure de

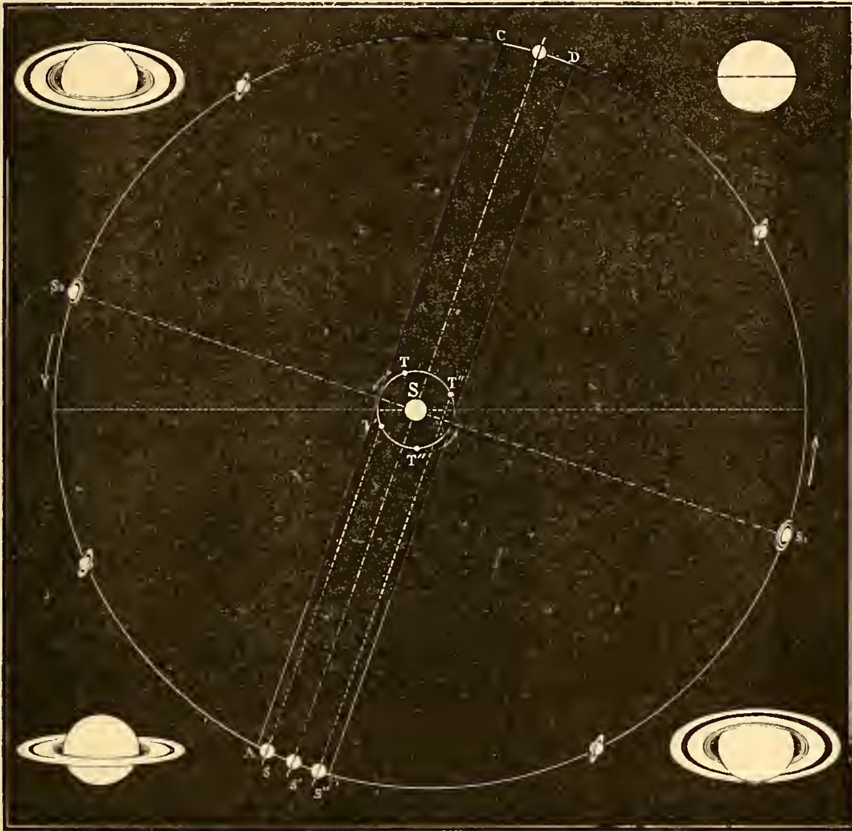


Fig. 171. Disparitions et réapparitions périodiques des anneaux de Saturne. Phases maxima.

l'anneau qui se projette très-obliquement pour nous sur la planète.

En dehors de ces deux positions particulières du plan de l'anneau, il est clair qu'une de ses faces est toujours éclairée par le Soleil, tandis que l'autre n'en reçoit aucun rayon de lumière. Mais l'orbite de Saturne étant extérieure à l'orbite terrestre, dont le rayon est d'ailleurs comparativement très-

petit, c'est toujours sa face éclairée que Saturne nous présente; seulement, pendant une moitié de la révolution, c'est la face boréale de l'anneau que nous voyons projetée sur l'hémisphère austral de la planète; pendant l'autre moitié de la révolution, nous voyons au contraire la face australe, qui se projette alors en sens inverse, c'est-à-dire sur l'hémisphère boréal. Enfin, selon la distance de Saturne aux deux positions premières où l'anneau disparaît, le système nous semble plus ou moins ouvert. En deux points de l'orbite diamétralement opposés, cette ouverture atteint un maximum tel, que l'anneau déborde le globe de part et d'autre, en masquant tantôt le pôle nord, tantôt le pôle sud de Saturne.

De cette explication sommaire, il résulte que tous les quinze ans, Saturne doit être vu dépourvu de son anneau; que tous les quinze ans aussi, l'appendice doit se montrer dans son maximum d'étendue ou de visibilité. Mais la disparition périodique qui résulte du passage du plan de l'anneau par le Soleil n'est pas la seule. L'anneau peut cesser d'être perceptible pour nous par une autre raison. Qu'on examine la figure 171, et l'on comprendra que pendant le temps que met Saturne à parcourir les deux arcs opposés, *ab* et *cd*, de son orbite (temps qui peut s'élever jusqu'à 360 jours), la Terre et la planète peuvent occuper deux positions telles que la première se trouve précisément aussi dans le plan de l'anneau. Cette circonstance qui, comme on voit, doit être voisine de l'époque de la disparition déterminée par la première cause, peut même se présenter jusqu'à trois fois à chaque période[1], et dans tous les cas, au moins une.

1. Donnons-en un exemple sur la figure. Saturne étant en S, et la Terre en T' sur la prolongation de la trace de l'anneau, nous ne voyons celui-ci que par sa tranche, *première disparition*. Les deux planètes continuent leur mouvement, la Terre quitte la trace du plan de l'anneau, qui ne passe point encore par le Soleil; l'anneau *reparaît*. Saturne arrive en S', tandis que la Terre est en T''; la trace passe par le centre du Soleil, l'anneau est invisible parce qu'il n'est plus éclairé que par sa tranche, *seconde disparition*. Au

La même raison qui empêcha pendant plus de quarante ans les astronomes du dix-septième siècle de reconnaître la véri-

bout d'un certain temps, nouvelle réapparition de l'anneau. Mais le mouvement de la Terre, plus rapide absolument et angulairement que celui de Saturne, l'amène en T‴ sur la prolongation de la trace de l'anneau qui est en S″; *troisième disparition* bientôt suivie elle-même d'une troisième réapparition. Il peut arriver, il est vrai, qu'aucun de ces phénomènes ne soit visible ou observable. C'est ce qui aura lieu en 1878, Saturne se trouvant alors voisin de sa conjonction, et plongé dans les rayons du Soleil. La théorie pour cette époque ne donne d'ailleurs qu'une seule disparition et réapparition, correspondant au passage de l'anneau par le Soleil. Donnons ici les éléments de l'anneau et de ses nœuds. L'inclinaison sur le plan de l'orbite de la Terre est égale à 28° 10′. Les nœuds ascendants et descendants de l'anneau ont pour longitudes 350° 52′ et 170° 52′. A 90° de chacun de ces points, en S_1 et S_2, se trouvent les deux positions opposées où les deux faces, boréale et australe, de l'anneau se présentent à la Terre avec leur maximum d'obliquité. Ces positions et les aspects correspondants de Saturne sont marqués dans la figure 171 (mais il importe de faire remarquer que la planète y est représentée sur son orbite, telle qu'on l'apercevrait de la Terre, et non en perspective, comme dans la figure 170).

C'est un problème intéressant que celui de la détermination et de la prédiction des phénomènes périodiques de la disparition de l'anneau de Saturne. Huygens l'a le premier abordé dans le *Systema Saturnium*. Dionis du Séjour, puis Lalande, en ont fait ensuite une étude géométrique et analytique détaillée. Enfin, Bessel (voy. la *Connaissance des temps pour* 1838) a appliqué au problème toutes les ressources de la science moderne. Nous empruntons à Biot, qui a résumé le travail de Bessel, les données suivantes relatives aux phénomènes antérieurement observés :

Époques des passages observés.	Passages du plan de l'anneau.	
16 octobre 1714.	par la Terre	Disparition.
10 février 1715.	par le Soleil	Réapparition.
22 mars —	par la Terre	Disp.
12 juillet. —	par la Terre	Réapp.
12 octobre 1773.	par la Terre	Disp.
11 janvier 1774.	par le Soleil	Réapp.
5 avril —	par la Terre	Disp.
30 juin —	par la Terre	Réapp.
5 mai 1789.	par la Terre	Disp.
20 août —	par la Terre	Réapp.
10 octobre —	par le Soleil	Disp.
29 janvier 1790.	par la Terre	Réapp.

Notons encore l'observation des phénomènes en 1832, 1833, 1848 et 1862.

table forme de l'appendice de Saturne, j'entends l'imperfection des lunettes, fut cause que l'anneau parut d'abord unique, ou simple. C'est en 1675 que D. Cassini[1] reconnut l'existence d'une ligne obscure divisant la largeur de l'anneau en deux parties égales : « La partie intérieure, disait ce célèbre astronome, est fort claire, et l'extérieure un peu obscure, la diffé-

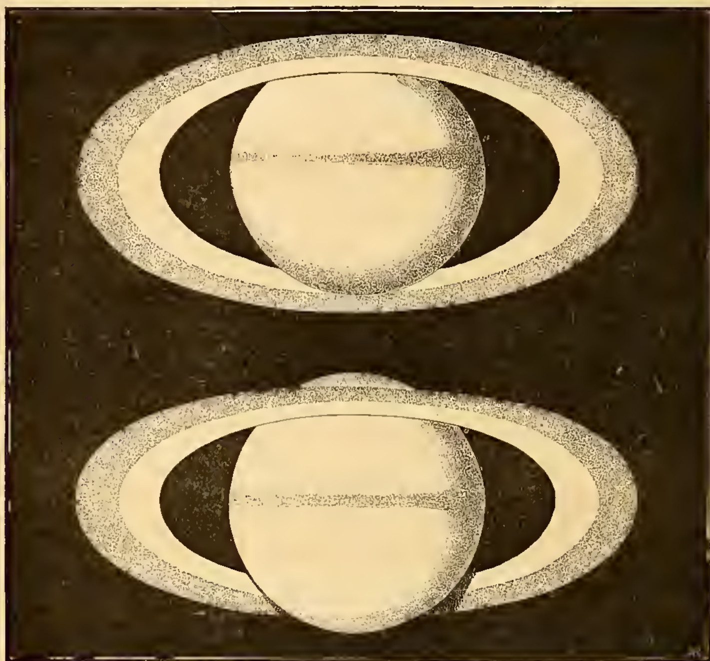


Fig. 172. Découverte du double anneau en 1675.
Observations et dessins de D. Cassini.

rence de teinte étant celle de l'argent mat à l'argent bruni. » La figure 172 représente, d'après les dessins de Cassini, l'aspect du double anneau à cette époque.

Depuis, le système a été l'objet des observations les plus

1. D'après les auteurs anglais, il paraît que dix ans plus tôt (en 1665), l'astronome W. Ball aurait, à l'aide d'une excellente lunette de 38 pieds de distance focale, reconnu que l'anneau était double : « That it is not one body of a circular figure, that embraces his disk, but two. »

minutieuses, rendues de plus en plus faciles par l'incessant perfectionnement des télescopes. Outre la division, qu'on nomme quelquefois la bande de Cassini, d'autres lignes sombres ont été vues, soit sur l'anneau extérieur, soit sur l'anneau intérieur. Ces divisions indiquent-elles des séparations réelles, comme il paraît prouvé qu'est la première, plus large, plus noire que toutes les autres, et d'ailleurs permanente? Il est difficile de le dire. Cependant, l'anneau extérieur, le plus sombre, que nous appellerons pour abréger, avec

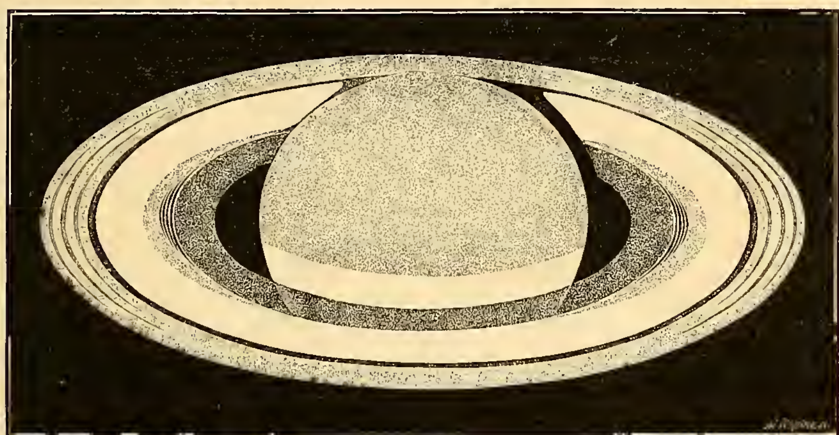


Fig. 173. Divisions de l'anneau extérieur. Observation et dessin de G. P. Bond le 9 janvier 1855.

O. Struve, l'anneau A, a été observé à diverses reprises divisé par une ligne noire, en deux parties inégales, la plus large étant la partie extérieure si l'on s'en rapporte aux mesures d'Encke (1837), étant la partie intérieure, au contraire, d'après Lassell et Dawes (1843). D'autres lignes ont été vues sur l'un et sur l'autre anneau, mais en nombres qui varient selon les époques et selon les observations.

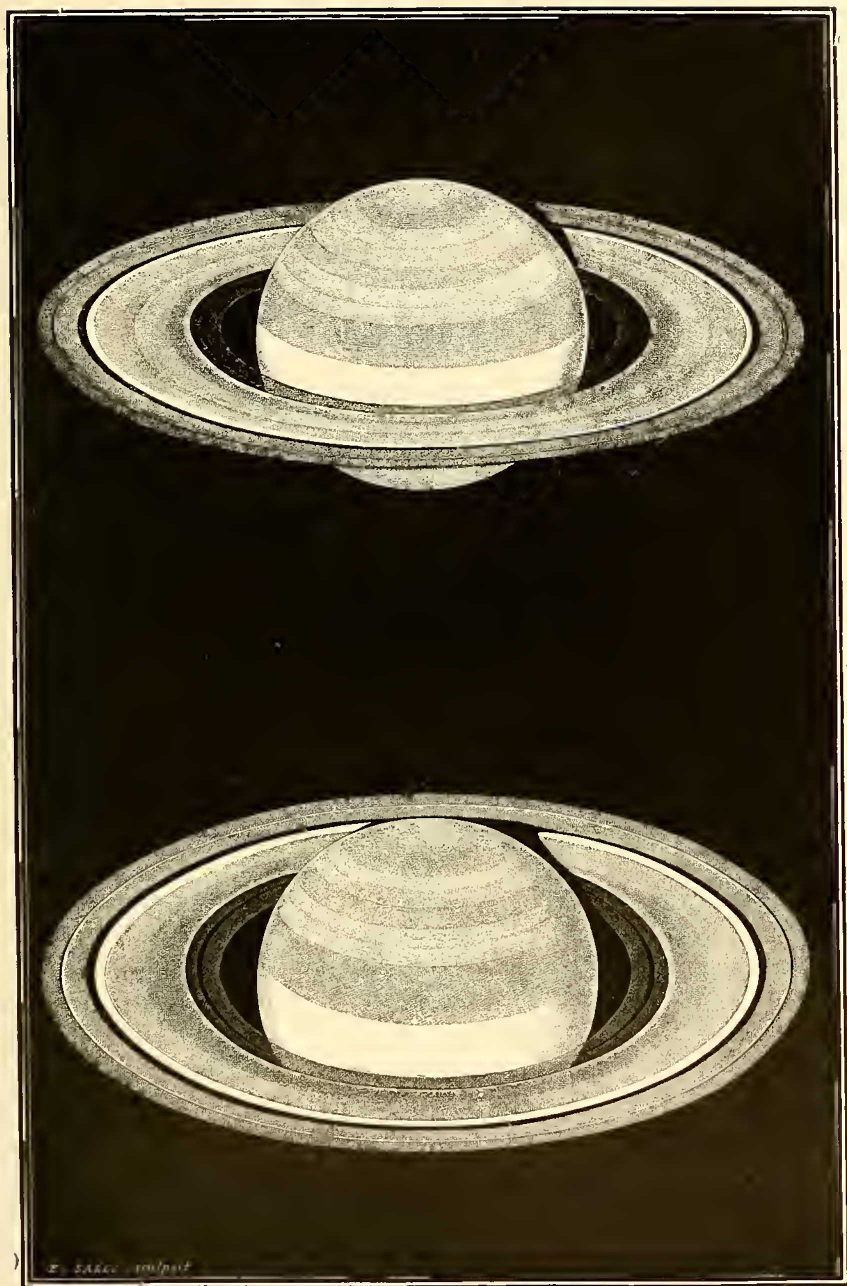
Dans la vue de Saturne (fig. 173) que nous empruntons à G. P. Bond, l'anneau A est divisé par 3 lignes sombres; il est quadruple. L'anneau B, plus voisin de Saturne, outre qu'il paraît plus sombre dans sa moitié la plus rapprochée de la

planète, est strié sur son bord interne de quatre ou cinq lignes observées avec soin par l'astronome américain, et qui semblent autant de divisions concentriques réelles.

Enfin, un troisième anneau, qu'on nomme l'anneau C, a été découvert à la fin de 1850, par M. Bond d'abord, puis par MM. Dawes et Lassell. Mais tandis que les deux autres anneaux sont opaques, réfléchissent inégalement mais vivement la lumière solaire, et d'ailleurs portent sur le globe de Saturne une ombre nettement marquée, ce troisième anneau est obscur, ne renvoie qu'une faible lumière et d'ailleurs est transparent, comme on l'a positivement constaté : à travers son épaisseur, on distingue en effet nettement les contours du globe de Saturne. L'anneau obscur et transparent a été lui-même reconnu double par O. Struve : un trait noir, visible de chaque côté des anses (pl. XXIV), le partage en deux parties légèrement inégales.

Tel est donc le curieux système des anneaux qui entourent Saturne à distance, et qui font de cette planète avec ses huit satellites, le plus étrange et le plus curieux échantillon de la distribution de la matière des cieux dans notre monde solaire. Avant de dire quels problèmes intéressants se posent devant ce merveilleux spectacle, il convient de donner une idée des dimensions relatives et réelles des diverses parties de l'appendice annulaire. Les voici d'après Struve, en y joignant comme termes de comparaisons les diamètres, équatorial et polaire, de Saturne :

		Mesures micrométriques.	Dimensions relatives.	Mesures kilométriques.
Anneau A extérieur	Rayon extérieur	20″.065	2.281	139 200
	— intérieur	17″.765	2.019	123 200
	largeur de l'anneau	2″.300	0.261	16 000
Intervalle des anneaux A et B		0″.495	0.056	3 430
Anneau B intermédiaire	Rayon extérieur	17″.270	1.964	119 770
	— intérieur	12″.650	1.438	87 740
	largeur de l'anneau	4″.620	0.525	32 030



SATURNE

D'après Warren de la Rue, G. P. Bond et O. Struve.

Anneau C inférieur ou obscur	Rayon extérieur	12″.650	1.438	87 740
	— intérieur	10″.615	1.208	73 625
	largeur de l'anneau.	2″.035	0.230	14 115
Rayon équatorial de Saturne.		8″.795	1.000	61 000
— polaire —		7″.845	0.892	54 400

D'après ces mesures, on voit que la largeur totale du système annulaire dépasse environ des $\frac{3}{40}$ le rayon équatorial de



Fig. 174. Saturne et son système d'anneaux, projeté sur le plan de l'équateur.

Saturne, c'est-à-dire embrasse un espace d'environ 65 600 kilomètres, ou 16 400 lieues. Le développement diamétral des anneaux mesure près de 70 000 lieues.

Quant à l'épaisseur de l'anneau, elle est très-faible. W. Herschel l'a plutôt évaluée que mesurée directement, en comparant le filet lumineux visible en août 1789 (à l'époque d'une

réapparition de l'anneau) avec deux des satellites, qu'il voyait passer sur lui « comme une perle sur un fil ». En admettant 0''.3 pour l'épaisseur apparente, l'épaisseur réelle serait de 2070 kilomètres; mais Schrœter ne donnait à la première que 0''.125 et sir J. Herschel 0''.03; G. P. Bond déduit de ses observations de 1848 à 1852 une épaisseur apparente plus petite que 0''.01.

§ 4. QUE SONT LES ANNEAUX DE SATURNE?

Nous avons une idée maintenant des apparences que présente le système annulaire de Saturne, vu de la Terre à des époques diverses; nous connaissons aussi les dimensions relatives de ses parties, mais cela ne peut suffire pour contenter notre curiosité à l'égard de cet étrange assemblage, auquel nous ne voyons rien d'analogue ni sur notre Terre, ni dans les autres planètes.

Que sont ces anneaux? Sont-ils réellement multiples, comme le laissent soupçonner les divisions nombreuses constatées à diverses reprises sur leur surface? Qu'ils soient au nombre de trois seulement ou un plus grand nombre, sont-ils à l'état solide, à l'état liquide, ou à l'état de gaz ou de vapeurs? ou encore, ne doit-on y voir que des agrégations de corpuscules isolés, à un état physique quelconque, mais assez nombreux et assez rapprochés pour présenter l'aspect que leur donnent les télescopes?

Toutes ces questions se posent nécessairement; et, dès l'origine des observations, on n'a pas manqué d'y répondre, comme toujours, par des conjectures. Énumérons rapidement les principales de ces hypothèses, en ne nous arrêtant qu'à celles qui ont été appuyées sur des raisons scientifiques, et qui ne sont point d'avance manifestement en contradiction avec les lois de la mécanique et de la physique.

Laissant de côté les suppositions nées de l'ignorance où l'on fut, dans les premiers temps, de la vraie forme de l'appendice saturnien, par exemple, celles de Galilée qui croyait Saturne triple, de Riccioli qui lui donnait une armille plate et adhérente, ou encore d'Hodierna qui faisait Saturne ovoïde et obscurci de chaque côté par deux énormes taches, nous citerons l'idée de Roberval qui voyait dans l'anneau une ceinture de nuages émanés de l'équateur de Saturne, puis celle de Maupertuis qui l'expliquait par le passage d'une comète qu'aurait retenue dans le système l'attraction du globe de la planète : la queue de l'astre chevelu, s'enroulant à distance autour de ce globe, avait, selon lui, constitué l'anneau; quant au noyau, il s'était transformé en satellite. Mairan, et après lui Buffon, ne voyaient dans l'anneau que les restes de l'équateur de Saturne, dont le globe, beaucoup plus étendu à l'origine, s'était peu à peu contracté par voie de refroidissement en abandonnant les portions les plus éloignées et les plus rapides. Enfin il faut signaler aussi l'opinion que Dionis du Séjour attribue à D. Cassini, mais qui paraît avoir été proposée par Cassini II, comme le prouverait ce passage tiré de ses *Eléments d'astronomie* (1740, p. 338) : « Cette apparence (celle des anneaux), dont nous ne voyons aucun exemple dans les autres corps célestes, nous a donné lieu de conjecturer que ce pouvoit être un amas de satellites, tous disposés à peu près sur un même plan, lesquels font leurs révolutions autour de cette planète : que leur grandeur est si petite qu'on ne peut les apercevoir séparément, mais qu'ils sont en même temps assez près l'un de l'autre pour qu'on ne puisse point distinguer les intervalles qui sont entre eux, en sorte qu'ils paroissent former un corps continu. »

Quelques-unes de ces hypothèses peuvent paraître plus ou moins vraisemblables, mais la plupart sont sujettes à des difficultés, qu'on peut formuler dans la série des questions suivantes, et que la théorie pouvait seule aborder.

Étant donné le système des anneaux qui entourent Saturne, et les satellites qui gravitent extérieurement, comment un tel système matériel, solide ou fluide, peut-il se soutenir sans point de contact ou d'appui avec la planète? Comment ses diverses parties résistent-elles à l'effort que l'attraction de Saturne exerce sur chacune d'elles, à celui qu'exercent pareillement les satellites? Ne semble-t-il pas que cet immense pont devrait peu à peu se désagréger, puis, catastrophe dont les cieux n'ont jamais présenté l'exemple aux regards de l'homme, se précipiter dans une chute effroyable sur le sol de Saturne? Laplace a abordé ce problème. Il a fait voir que l'équilibre n'est possible et stable qu'autant que la section de l'anneau, normale à sa surface, ait la forme d'une ellipse dont le grand axe est dirigé vers le centre de la planète, et présente en plusieurs points des inégalités de largeur ou de courbure[1]. Dans de telles conditions, en effet, le centre de gravité de l'anneau ne coïncide pas avec celui de la planète, et il en doit résulter de lentes oscillations dans leurs positions relatives. De plus, condition essentielle, les anneaux doivent tourner sur eux-mêmes autour d'un axe perpendiculaire à leur plan et passant par le centre de Saturne; « afin, dit-il, que leur pesanteur vers la planète soit balancée par leur force centrifuge due à ce mouvement. » La vitesse de rotation doit être pour cela d'un peu plus de dix heures. Les observations d'Herschel s'accorderaient ainsi avec les résultats du calcul, puisque ce laborieux et fécond astronome a déduit de ses observations de 1790 une durée de rotation de 10 heures 32 minutes. « Il y a de temps en temps sur la surface de l'anneau, dit-il, lorsqu'il va

1. « Ces inégalités, dit Laplace, sont indiquées par les apparitions et les disparitions de l'anneau de Saturne, dans lesquelles les deux bras de l'anneau ont présenté des phénomènes différents : elles sont même nécessaires pour maintenir l'anneau en équilibre autour de la planète ; car s'il était parfaitement semblable dans toutes ses parties, son équilibre serait troublé par la force la plus légère, telle que l'attraction d'un satellite, et l'anneau finirait par se précipiter sur la planète. »

disparaître ou peu après sa réapparition, des inégalités qui, d'un certain point de vue, peuvent être appelées réelles, car elles proviennent, selon toute apparence, de taches lumineuses, débordant par irradiation. » Ainsi, du même coup se trouveraient confirmées par l'observation deux des principales conditions d'équilibre, indiquées par Laplace : les inégalités de structure des anneaux et leur mouvement de rotation. Le dessin de la figure 175, dû à G. P. Bond, fait à

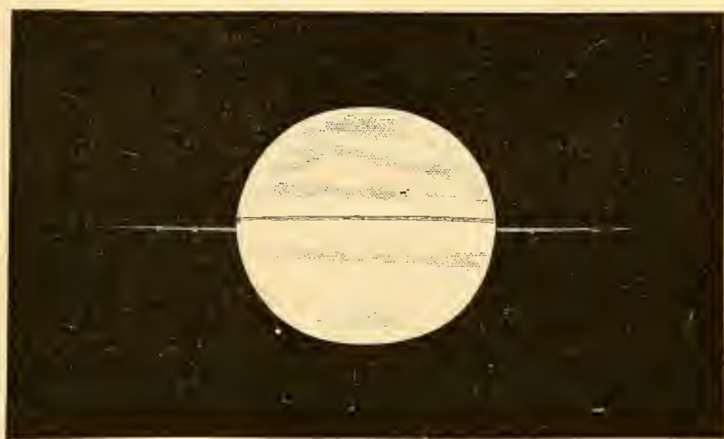


Fig. 175. Saturne, le 28 novembre 1848, d'après G. P. Bond.
Lignes et points brillants, visibles à l'époque du passage du plan de l'anneau par le Soleil.

l'époque où l'anneau venait de disparaître par suite du passage à l'un des nœuds, laisse voir de chaque côté les inégalités ou points brillants de W. Herschel. Mais l'astronome américain attribue ces apparences aux parties de l'anneau que le Soleil éclairait encore à cette époque, dans le sens de l'épaisseur; et à l'appui de cette explication, il donne la figure 176, que nous reproduisons ici. Du reste, il ne fait point mention du déplacement des points brillants, que signalait Herschel.

On ne peut donc dire encore s'il est vrai que l'observation

ait confirmé les conditions données par Laplace comme des éléments indispensables de l'équilibre. Il faut avouer en outre qu'en ce qui concerne la rotation de l'anneau, il n'y a que la seule observation de W. Herschel, laquelle d'ailleurs a paru contredite par des observations beaucoup plus nombreuses. Cassini, Maraldi, Herschel lui-même dans le dernier siècle, Harding et Schrœtér dans le nôtre, ont vu, aux époques de disparition, une seule anse se montrer et rester persistante pendant plus de temps que n'exigerait la rotation calculée ou

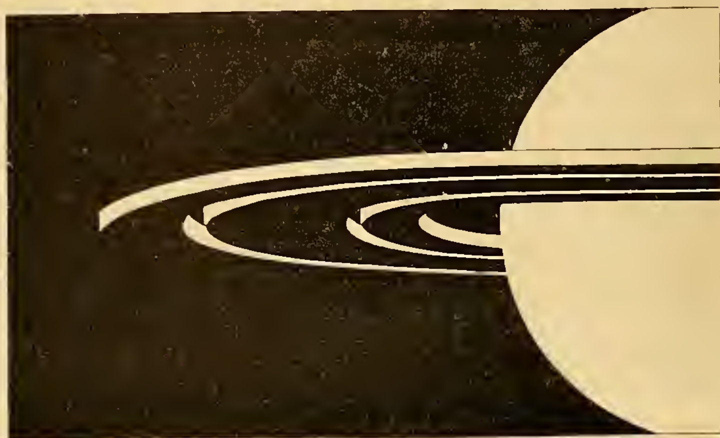


Fig. 176. Explication des points brillants qui accompagnent Saturne, pendant la disparition de l'anneau. (D'après Bond.)

observée. La théorie semble donc ici plus affirmative et plus sûre que les observations mêmes, car aucun astronome ne met en doute la réalité d'un mouvement de rotation dans le système de l'anneau, qu'il soit continu ou discontinu.

L'excentricité du système annulaire, par rapport au globe de Saturne, est en revanche un fait qui paraît hors de contestation. « Le 14 septembre 1842, dit Arago, à 7 heures 30 minutes, la planète est sensiblement plus rapprochée de l'anneau à l'Occident qu'à l'Orient; la différence des deux distances a

paru être de 8 à 9 dixièmes de seconde. » Les trois jours suivants, cette différence diminua de plus en plus[1].

Un éminent astronome russe contemporain, M. Otto Struve, qui a étudié et mesuré avec tant de soin le système des anneaux de Saturne, a publié en 1852 un mémoire d'où il résulterait que le système a subi, depuis l'époque de la découverte, des changements considérables, tant dans sa position que dans ses dimensions propres. La figure 177, qui reproduit les dimensions relatives de l'anneau et du globe de

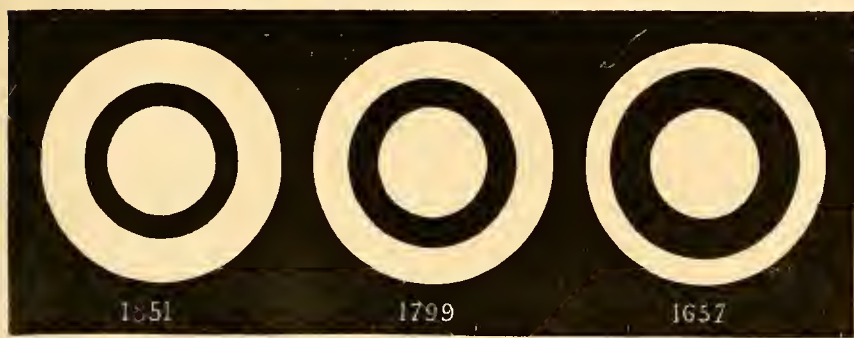


Fig. 177. Variations dans les dimensions des anneaux de Saturne, dans l'intervalle de deux siècles.

Saturne aux trois époques de 1657, de 1799 et de 1851, met en évidence ces changements de dimensions. D'une discussion approfondie des observations antérieures, comparées aux observations plus récentes des astronomes contemporains et aux siennes propres. Struve tire les conclusions suivantes :

1° Le bord intérieur des anneaux s'approche continuellement du globe de la planète ;

1. Observations analogues antérieures : Gallet (d'Avignon) en 1684; Schwabe, de Dessau en 1826; W. Struve, en mars et avril 1828. Picard, dès 1667, constatait une excentricité dans un autre sens, celui du petit axe de l'anneau, l'un des pôles de Saturne paraissait déborder l'anneau vers le nord; au sud, l'autre pôle était comme retranché. Arago, en 1824, observa le même phénomène en sens invérse.

2° Le rapprochement du bord intérieur est combiné avec un accroissement de la largeur totale des anneaux ;

3° Dans l'intervalle entre les observations de J. D. Cassini et celles de W. Herschel, la largeur de l'anneau B a augmenté en plus forte raison que celle de l'anneau A[1].

Il reste toujours à se demander quelle est la nature physique des anneaux, si la matière qui les compose est à l'état solide, et dans ce cas, s'ils sont continus ou formés de molécules désagrégées ; s'ils sont au contraire à l'état fluide, constitués par des masses liquides ou des masses vaporeuses. Un de nos savants compatriotes, M. Hirn, a abordé ces questions en introduisant dans ses recherches des considérations nouvelles empruntées à la théorie mécanique de la chaleur et aux données de la physique[2]. Selon lui, il n'est pas possible, à moins de leur supposer une densité inadmissible, de regarder les anneaux comme des solides continus ; il faudrait tout au moins

1. En 1852, la distance entre le bord intérieur de l'anneau obscur et la planète, était de 1''.615. Selon O. Struve, le rapprochement annuel serait de 0''.0130. Mais il paraît avoir été aussi grand dans les 52 dernières années que dans les 142 précédentes (de 1657 à 1851), et il résulterait de là une augmentation de vitesse avec la diminution de distance. Mais en prenant la vitesse moyenne de 0''.013, on voit qu'en 125 ans le système annulaire se trouverait en contact avec le globe de Saturne. Dans un siècle d'ici, c'est-à-dire en 1976, la réunion, dans l'hypothèse de l'astronome russe, sera un fait accompli. Mais il reste toujours à faire une réserve au sujet de ces changements si remarquables, celle que nous faisions dans nos précédentes éditions, en ces termes :

« Ces modifications continueront elles de se produire dans le même sens, ou bien seront-elles suivies de changements inverses? Graves questions qui intéressent la conservation de l'appendice annulaire. Il est peut-être réservé aux générations futures d'assister au plus émouvant de tous les phénomènes que puisse présenter à l'homme le monde solaire, dont sa demeure fait partie. Peut-être verra-t-on dans les cieux le grandiose et formidable spectacle du cataclysme produit par la dislocation des anneaux de Saturne. »

Un de nos savants compatriotes, M. Hirn a jeté, comme on va le voir plus loin, un nouveau jour sur l'épineuse question théorique de l'équilibre des anneaux de Saturne.

2. *Mémoire sur les conditions d'équilibre et sur la nature probable des anneaux de Saturne.* Paris, 1872.

que la largeur de chacun fût au minimum de 1100 lieues; les deux anneaux A et B seraient ainsi formés de 7 ou 8 anneaux distincts, tournant les uns dans les autres. Les conditions d'équilibre formulées par Laplace, l'existence d'inégalités formant lest et la rotation, ne suffiraient point d'ailleurs, si l'on ne supposait à la matière solide des anneaux une cohésion et une rigidité presque absolues. M. Hirn conclut à l'impossibilité, pour des anneaux solides et continus, de résister à toutes les causes de désagrégation ou de rupture.

Peuvent-ils être considérés comme des masses liquides ou gazeuses? Là, faisant intervertir des considérations de thermodynamique, M. Hirn montre que, dans ces deux cas, il y aurait transformation en chaleur du mouvement des anneaux, que leur mouvement sensible diminuant, la masse se rapprocherait progressivement de la planète, à laquelle l'appendice finirait, dans la suite des temps, par se réunir.

Cette discussion amène en fin de compte notre savant compatriote à considérer les anneaux comme des agrégations de corpuscules, de solides discontinus, se mouvant isolément autour de Saturne, comme autant de satellites, assez distincts d'ailleurs les uns des autres, relativement à leur grosseur, pour que l'action réciproque de ces petites masses ne soit qu'une force perturbatrice très-faible, eu égard à l'action de Saturne. Nous ne pouvons reproduire ici toutes les raisons sur lesquelles l'auteur du mémoire appuie son hypothèse. Rappelons seulement que la première idée en a été exprimée par Cassini II, dans le passage cité plus haut, et qu'un savant anglais, M. Clark-Maxwell, a publié en 1859 des recherches qui aboutissent à des conclusions analogues[1].

1. « Le résultat final de cette théorie mécanique, dit-il, est que le seul système d'anneaux qui puisse exister doit être composé d'un nombre indéfini de particules indépendantes, tournant autour de la planète avec des vitesses différentes, selon leurs distances respectives. Ces particules peuvent être

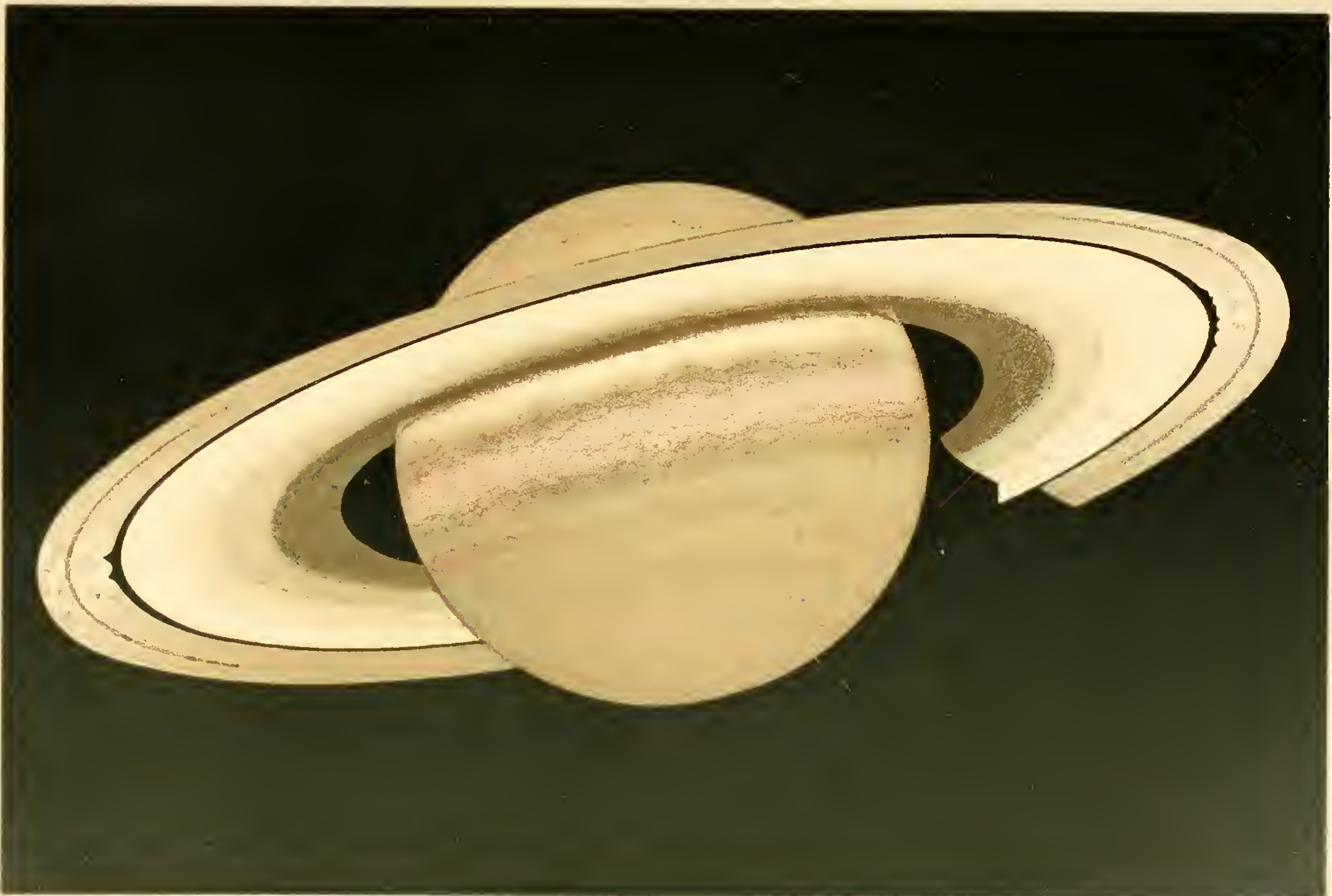
La diaphanéité de l'anneau obscur le plus voisin de Saturne peut s'expliquer par la fluidité ; mais elle se conçoit mieux encore, s'il est composé de particules beaucoup plus rares que les deux autres anneaux. Serait-il, comme M. Faye l'a laissé entendre, le produit d'une désagrégation de ceux-ci? En tout cas, Struve a fait voir que cet anneau, découvert en 1848, existait dès l'origine des observations ; mais le rapprochement continu de l'ensemble du système, signalé par l'astronome russe, n'est-il pas un témoignage certain de la lente dissolution de l'appendice, quelle que soit d'ailleurs la cause mécanique ou physique de cette dissolution? Les observations ultérieures pourront seules dire de quel côté est, sinon la vérité, du moins la vraisemblance.

§ 5. RECHERCHES NOUVELLES SUR LA CONSTITUTION PHYSIQUE DE SATURNE ET DE SES ANNEAUX.

Un astronome américain, M. L. Trouvelot, a fait pendant quatre années consécutives, de 1871 à 1875, avec les puissants instruments de l'observatoire d'Harvard College, une série d'observations fort intéressantes de Saturne et de son anneau. Nous reproduisons dans notre planche XXIV *bis* le beau dessin qui accompagne son mémoire, et à cette occasion, nous allons entrer de nouveau dans quelques détails sur la constitution physique du système.

En ce qui concerne le globe de Saturne, le savant américain fait seulement quelques remarques sur la lumière, la couleur et les bandes. Le globe lui a paru d'aspect nuageux, comme

arrangées en séries d'anneaux étroits, ou bien elles peuvent se mouvoir à travers leur ensemble d'une manière irrégulière. Dans le premier cas, la destruction sera extrêmement lente ; dans le second, elle sera plus rapide ; mais il pourrait se produire une tendance vers un arrangement en anneaux étroits, arrangement qui retarderait le progrès de la destruction. » (*Monthly notices*, t. XIX.)



F. Méheux Chromolith.

Imp. Fraillery, Paris

SATURNE

et le Système de ses Anneaux, le [illegible] Décembre 18[illegible]4

d'après [illegible] Observations [illegible] L. TROUVELOT

Jupiter, mais les nuages plus finement divisés offraient l'aspect des cirrus de notre atmosphère : au plus, il a vu trois ou quatre bandes parallèles. Cela prouverait que la surface est sujette à des variations d'aspect suivant les époques. Bond a vu, à quinze jours d'intervalle, des bandes nombreuses, bien définies, varier de nombre et de disposition, ainsi que le montrent les dessins de la figure 178. La zone équatoriale a paru à M. Trouvelot, teinte d'une légère nuance de rouge-carmin, terminée au nord et au sud par des bandes nuageuses grisâ-

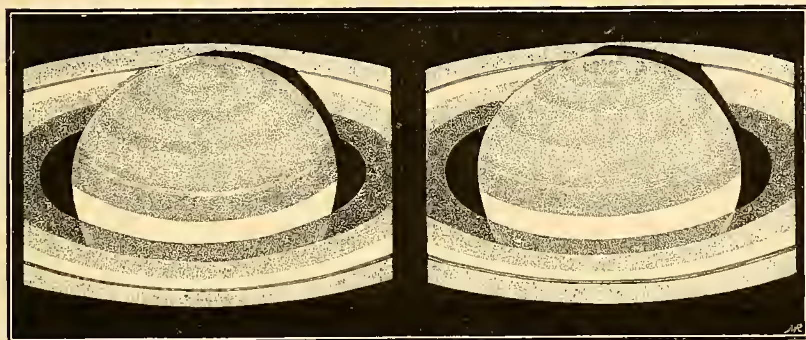


Fig. 178. Bandes du globe de Saturne, d'après G. P. Bond.

tres. La couleur générale de la planète diffère de celle de l'anneau qui est légèrement jaunâtre.

C'est principalement sur les anneaux que portent les observations que nous résumons rapidement. M. Trouvelot n'a pu voir sur l'anneau extérieur qu'une légère division plutôt grisâtre que noire, et apparente seulement sur les anses. On sait que Bond avait observé jusqu'à trois divisions (page 489). Quant à la division principale, elle lui a toujours semblé moins sombre que le fond du ciel, ce qui lui fait douter qu'il y ait là un vide réel entre les anneaux. Il n'a pu distinguer la lumière de la planète dans toute la partie de la division principale qui se projette sur le globe. Cette difficulté ne tiendrait-elle pas à l'épaisseur obscure de l'anneau?

Relativement à l'anneau obscur, qui lui a semblé unique comme à Bond, il a nettement reconnu qu'il n'est transparent que dans une partie de sa largeur, contrairement aux observations antérieures qui laissaient voir le globe de Saturne dans toute l'étendue de la portion de l'anneau qui se projetait sur lui. La partie de cet anneau la plus voisine de la planète ne masque nullement la lumière de celle-ci, lumière qui est partiellement éteinte par la partie médiane, tandis que celle qui avoisine l'anneau B est tout à fait dense et opaque.

Une particularité curieuse, qu'on peut observer sur notre dessin, est celle qui montre l'anneau extérieur A, comme découpé ou dentelé sur son bord interne. M. Trouvelot n'a pu constater de mouvement de rotation dans ces accidents, qui se trouvent, il est vrai, dans la position la plus défavorable pour ce genre d'observation, leur mouvement en avant ou en arrière s'effectuant précisément dans la direction du rayon visuel.

Enfin, de la forme singulière du contour de l'ombre que Saturne projetait sur l'anneau, le savant américain croit pouvoir conclure que l'épaisseur du système des anneaux va en croissant depuis le bord intérieur de l'anneau obscur jusqu'à la division principale. Le bord extérieur de l'anneau le plus brillant serait ainsi à un niveau plus élevé que l'anneau extérieur ; de plus, il offrirait des protubérances qui expliquent, selon lui, les points brillants aperçus par Bond, à l'époque de la disparition de l'anneau.

Il nous paraît résulter de ces observations nouvelles que le système des anneaux, et Saturne lui-même, avaient subi des changements réels, depuis Bond (1848-1857) jusqu'à 1874, et qu'ainsi, comme O. Struve l'avait montré déjà relativement aux dimensions, l'état physique de la planète et de ses étranges appendices n'est rien moins que stable.

On a vu quelles doivent être, pour le globe de Saturne, les

alternatives des journées et des nuits et celles des saisons. On comprendra, en se reportant à ce qu'on sait de l'inégalité des jours et des nuits à la surface de la Terre, que des inégalités semblables ont lieu pour un même endroit de la planète dans le cours de l'année, et au même instant pour les diverses latitudes. Aux deux pôles et dans toute l'étendue des zones polaires, ces inégalités atteignent leur maximum. Pendant quinze de nos années, le Soleil ne quitte pas le pôle boréal, et une nuit de même longueur enveloppe le pôle sud de Saturne : c'est l'inverse qui se présente pour les quinze années qui suivent. Sans doute, un froid intense est la conséquence de cette privation si prolongée de rayons de lumière et de chaleur. Est-ce à ce long hiver, aux glaces et aux neiges dont se couvrent sans doute les régions polaires, qu'il faut attribuer la zone blanchâtre qu'on a remarquée tout autour des pôles[1] ? A une telle distance les détails physiques disparaissent, et l'on est réduit à de simples hypothèses. L'atmosphère de Saturne est sans doute très-épaisse, surtout près des régions équatoriales : les bandes brillantes dont le disque est entouré sont probablement produites par la réflexion de la lumière sur d'immenses masses nuageuses, que la rapidité du mouvement de rotation accumule incessamment. Les bandes sombres indiqueraient une atmosphère plus sereine, à travers laquelle on peut apercevoir la surface moins réfléchissante, et dès lors plus obscure, de la planète.

L'analyse spectrale a d'ailleurs confirmé récemment ces prévisions. D'après M. W. Huggins, « le spectre de Saturne est

1. Les régions polaires, boréale et australe, de Saturne n'ont pas ordinairement le même éclat, et on a constaté que le plus lumineux, le plus blanc des deux pôles est toujours celui de l'hémisphère qui se trouve opposé au Soleil à l'époque de l'observation. Il y a là une évidente analogie avec les variations qu'on observe dans l'intensité lumineuse et l'étendue des calottes polaires de Mars. Est-il permis d'en conclure que ces phénomènes sont dus à des causes semblables?

faible, mais on y découvre quelques raies semblables à celles qui distinguent le spectre de Jupiter. Ces raies sont moins fortement indiquées dans la lumière des anses des anneaux, et nous montrent ainsi que le pouvoir absorbant de l'atmosphère autour des anneaux est plus faible que celui de l'atmosphère entourant le globe de la planète. Un savant français, M. Janssen, a trouvé tout récemment que plusieurs des raies atmosphériques sont produites par la vapeur d'eau. Il est vraisemblable que cette vapeur aqueuse existe dans les atmosphères de Jupiter et de Saturne. » Le P. Secchi a trouvé une pareille analogie entre les spectres lumineux des deux planètes ; de plus, il a observé dans celui de Saturne des raies qui ne coïncident avec aucune des raies telluriques produites par l'absorption de notre atmosphère. L'atmosphère de Saturne contient donc sans doute des gaz qui n'existent pas dans la nôtre.

D'après une observation intéressante de M. Chacornac, qui a pu suivre l'un des satellites de Saturne, pendant son passage apparent sur le disque de la planète, les bords de ce disque seraient plus lumineux que les régions centrales. On sait que l'inverse a lieu pour Jupiter[1]. Il concluait de ce fait que l'atmosphère de Saturne est d'une constitution analogue à celle des atmosphères de la Terre et de Mars ; mais nous venons de voir que l'analyse spectrale la montre analogue à celle de Jupiter.

§ 6. LES SATELLITES DE SATURNE.

Tel nous apparaît Saturne, à l'énorme distance où il se trouve de la Terre. Nous l'avons dit, c'est le plus riche des

1. C'est le contraire de l'une des conclusions du mémoire de M. Trouvelot. « La planète, dit-il, est moins lumineuse près du limbe que dans les régions plus rapprochées du centre, la lumière diminue graduellement d'intensité du centre aux bords. »

systèmes ou mondes secondaires, dont l'ensemble forme le monde solaire : il se distingue de tous les autres, non-seulement par le triple anneau, témoignage encore subsistant de la formation des planètes, mais encore par ses huit satellites, dont la circulation incessante autour du globe central ajoute à la variété des phénomènes de son ciel.

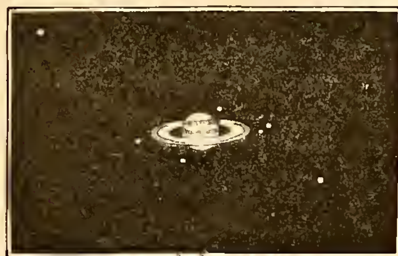


Fig. 179. Saturne et ses satellites, d'après J. Herschel (3 juin 1836).

Voici les noms des huit lunes de Saturne avec leurs distances au centre de la planète évaluées en lieues, et les durées de leurs révolutions évaluées en jours solaires terrestres[1] :

		Distances au centre de Saturne. En rayons de Saturne.	En lieues.	Durées des révolutions.			
I.	Mimas	3.36	51 750	0^j	22^h	37^m	23^s
II.	Encelade . . .	4.31	66 400	1	8	53	7
III.	Téthys	5.34	82 200	1	21	18	26
IV.	Dioné	6.84	105 300	2	17	41	9
V.	Rhéa	9.55	147 100	4	12	25	11
VI.	Titan	22.14	341 000	15	22	41	25
VII.	Hypérion . . .	26.78	412 500	21	7	7	41
VIII.	Japet	64.36	991 000	79	7	53	40

Les quatre premiers satellites sont tous plus voisins de Saturne que la Lune ne l'est de la Terre. Ils le seraient plus encore, si l'on mesurait leurs distances aux points de leur surface les plus rapprochés. Mimas n'est plus guère alors en moyenne qu'à une distance de 36 350 lieues, et Dioné, à 90 000 lieues. Leurs distances à l'arête de l'anneau extérieur sont plus

1. En doublant les durées des révolutions de Mimas et d'Encelade, on trouve presque identiquement celles des satellites Téthys et Dioné. Ce rapprochement curieux est dû à sir J. Herschel. On pourrait y joindre une remarque semblable pour Japet, dont la révolution est égale à 5 fois environ celle de Titan.

courtes encore, et Mimas s'en rapproche jusqu'à 17 450 lieues. Mais il faut observer que les plans des orbites des satellites sont inclinés sur le plan de l'anneau.

D'autre part, Japet est plus de dix fois aussi éloigné de Saturne que nous le sommes de notre satellite, de sorte que la

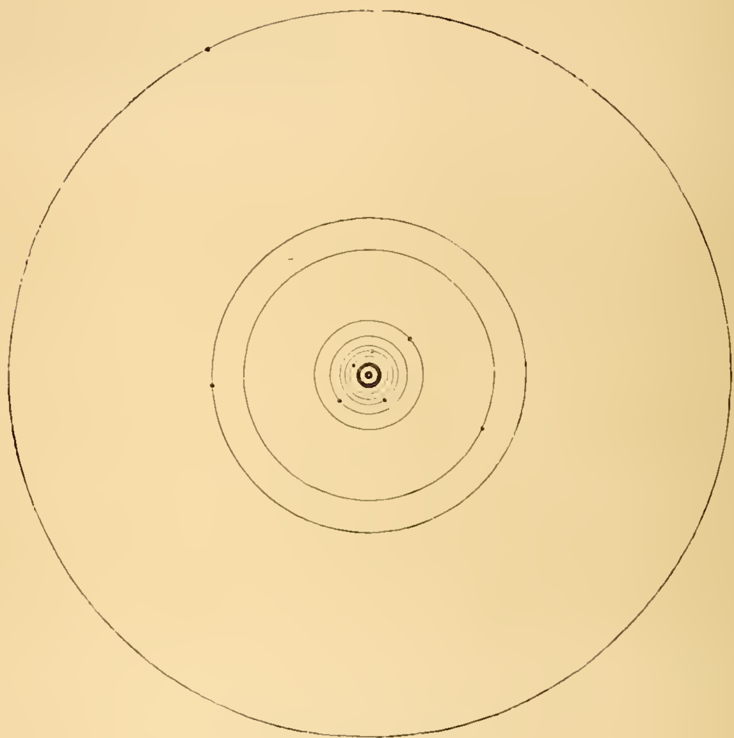


Fig. 180. Orbites des huit satellites de Saturne.

sphère d'attraction du globe central s'étend à près d'un million de lieues, et que le monde de Saturne mesure environ deux millions de lieues dans son plus grand diamètre. La figure 180 montre le système des orbites avec leurs dimensions relatives, projetées sur le plan de l'équateur de Saturne. Ces courbes sont des ellipses dont l'excentricité est peu exactement connue, et leurs plans coïncident à peu de chose près avec le plan de l'anneau et de l'équateur de Saturne. Le

8e satellite, Japet, fait seul exception, et l'inclinaison de son orbite sur l'équateur atteint 12° 14'. D'après Laplace, cette différence s'explique par l'action prépondérante de Saturne « qui, en vertu de son aplatissement, retient les six premiers orbes et ses anneaux dans le plan de son équateur » ; tandis que l'action du Soleil, qui tend à les en écarter, n'est sensible que pour le satellite le plus éloigné de la planète.

On voit par les durées des révolutions, combien les mou-

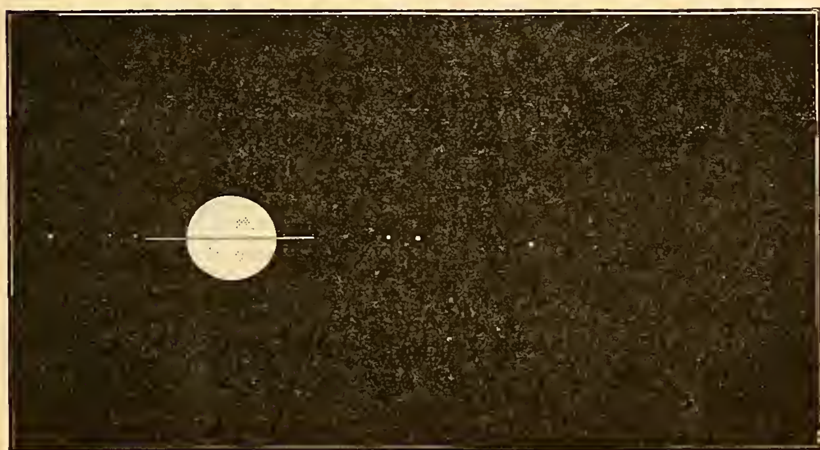


Fig. 181. Découverte du 8e satellite, d'après Bond.

vements des satellites sont rapides, et comme leurs phases doivent varier à des intervalles rapprochés, pour les habitants de la planète centrale. Mimas passe de l'état de nouvelle lune à celui de pleine lune en moins de 12 heures, un peu plus d'un jour de Saturne. En un ou deux jours, les quatre lunes suivantes présentent la même succession d'apparences. Seul, Japet accomplit sa révolution entière en un temps plus long que notre mois lunaire.

Plusieurs des satellites de Saturne sont très-difficiles à voir, et exigent, pour être distingués sur le fond sombre du ciel,

des observateurs exercés, armés d'instruments puissants[1]. Néanmoins, on a pu évaluer le diamètre de Titan, le plus grand de tous. Ce diamètre ne serait pas moindre que la seizième partie de celui de Saturne, c'est-à-dire plus de la moitié du diamètre terrestre, et à peu de chose près le diamètre de Mars. Ainsi, un des corps secondaires de ce monde merveilleux dépasse en grosseur des planètes telles que Mercure et Mars; son volume est environ neuf fois celui de notre Lune.

D. Cassini avait remarqué déjà que l'intensité lumineuse du 8e satellite n'est pas constante, et que, périodiquement, il disparaissait vers l'orient de la planète. W. Herschel a étudié avec soin ces variations : il en a conclu que Japet tourne sur lui-même dans le même temps qu'il accomplit sa révolution autour de Saturne. Comme la Lune, comme plusieurs des satellites de Jupiter, Japet montre donc toujours la même face à la planète.

Les plans des satellites étant, comme celui de l'équateur et des anneaux de Saturne, assez fortement inclinés sur le plan de l'orbite, leurs éclipses, quand ils traversent le cône d'ombre de la planète, sont loin d'être aussi fréquentes que les éclipses des satellites de Jupiter. Elles sont aussi, à cause de l'éloignement presque double, d'une observation beaucoup plus difficile. Quant aux passages des satellites sur le disque, aux ombres qu'ils y projettent, ce sont également des phénomènes

1. L'observation des satellites de Saturne est plus aisée, si, comme Vico l'a fait le premier, on prend soin de couvrir avec un écran opaque le globe lumineux et l'anneau. L'extrême petitesse de la plupart de ces petits corps explique pourquoi ils ont été découverts à de si longs intervalles les uns des autres : le 6e (dans l'ordre des distances) a été vu pour la première fois par Huygens en 1655; le 5e et le 8e par Cassini, en 1671 et 1672; le 3e et le 4e par Cassini en 1684; le 1er et le 2e par W. Herschel en 1789; enfin le 8e a été découvert en 1848 seulement par Bond et Lassel. La figure 181 montre à la fois les huit satellites avec leurs positions et leur éclat relatif, dans la soirée où Bond découvrit Hypérion, le 8e satellite dans l'ordre des dates, le 7e dans l'ordre des distances à la planète.

plus rares, et plus rarement observés, bien qu'ils puissent être aperçus de la Terre : on cite l'observation faite le 2 novembre 1789, par W. Herschel, qui vit nettement l'ombre du 6ᵉ satellite (Titan) parcourir le disque lumineux de la planète. M. Lockyer, en avril 1862, a aussi constaté la présence de l'ombre projetée par Titan sur le disque de Saturne, c'est-à-dire une éclipse totale de Soleil pour la région ainsi momentanément observée. M. Dawes a fait une observation analogue. M. G.-P. Bond, dont la science déplore la perte récente, avait aussi vu l'ombre du satellite sur la planète, le 10 octobre



Fig. 182. Passage de Titan sur Saturne, le 1ᵉʳ mai 1862, d'après un dessin de J. Chacornac

1848. Mais aucun de ces savants n'avait, je crois, observé le satellite lui-même.

C'est une observation de ce genre, bien connue des astronomes, et due à J. Chacornac (à l'aide du grand télescope à miroir argenté de L. Foucault), que nous mettons ici sous les yeux du lecteur. La figure 182 est la reproduction d'un dessin que l'auteur a eu l'obligeance de nous communiquer ; elle laisse voir très-nettement le disque de Titan se détachant comme un cercle plus brillant que le fond lumineux de la planète. L'ombre paraît tangente au satellite lui-même. Ce qu'il importe de remarquer, c'est que, dès le début de l'observation, l'ombre avait paru visible, tandis que c'est seulement

quand le satellite se fut avancé jusqu'au tiers du rayon de Saturne que son éclat permit de le voir ; on sait que le phénomène inverse se présente pour les satellites de Jupiter. Titan disparut, de l'autre côté, à pareille distance. Cette particularité viendrait à l'appui de l'opinion que les bords du disque de Saturne sont plus lumineux que les régions centrales, circonstance que M. Bond avait déjà constatée, mais qui, nous l'avons vu plus haut, est rejetée par M. Trouvelot. Les bandes sombres de l'atmosphère austral présentaient, lors de l'observation faite par Chacornac, une teinte rougeâtre très-légère, et comme vue au travers d'un voile, qui n'existait pas dans les bandes boréales. Ces dernières, plus sombres que les autres, offraient une teinte grise.

§ 7. LE CIEL ET LA MÉTÉOROLOGIE DE SATURNE.

Transportons-nous maintenant en pensée sur un point du globe de Saturne. De là, jetons un coup d'œil sur les apparences que la voûte céleste y doit offrir pendant le jour et pendant la nuit.

Si nous partons de l'un ou de l'autre pôle, en nous avançant jusqu'au 63e degré de latitude, nous aurons à parcourir tous les lieux de l'hémisphère saturnien où le triple anneau n'est jamais visible. Seuls, les satellites s'élèvent sur l'horizon, et présentent au spectateur l'aspect varié de leurs phases.

A partir de cette latitude, le système annulaire commence à être visible. Mais c'est seulement pendant les deux saisons de printemps et d'été que la face des anneaux tournée vers l'hémisphère où nous sommes placés, reçoit les rayons du Soleil, et illumine par réflexion les nuits de la planète. Pendant la journée, leurs arcs n'envoient qu'une faible lumière, analogue sans doute pour la nuance et l'éclat à la lumière de la

Lune, quand elle est visible en plein jour. La forme et l'étendue des immenses arches lumineuses varient d'ailleurs suivant la latitude. En partant du 63e degré, pour s'avancer vers l'Équateur, on les voit s'élever de plus en plus au-dessus de l'horizon. D'abord, c'est une faible partie de l'anneau extérieur, puis cet anneau dans sa largeur totale. Aux latitudes moyennes de 45°, on aperçoit les deux premiers anneaux, et entre eux le vide qui les sépare. A mesure qu'on descend

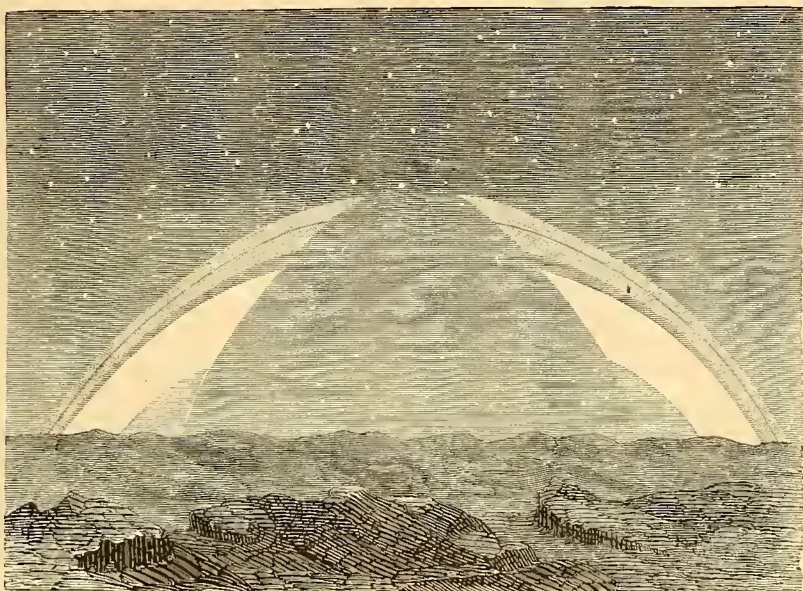


Fig. 183. — Les anneaux vus de Saturne, à une latitude de 28°. Vue idéale prise à minuit, entre les équinoxes et les solstices saturniens.

vers les régions équatoriales, le système entier devient visible, mais en même temps, les rayons visuels ayant une direction plus oblique, les anneaux diminuent de largeur apparente. A l'Équateur même, ils ne sont plus visibles que par leur tranche intérieure. Cette tranche se présente alors comme un immense ruban lumineux qui s'étend d'Orient en Occident, en passant par le zénith.

Pour donner une idée du magnifique spectacle que pré-

sente la voûte étoilée pendant les nuits des saisons estivales, nous avons dessiné, en nous conformant aux lois de la perspective, l'apparence des anneaux, pour une latitude comprise entre le 25e et le 30e degré. Ce sont deux vues idéales prises à minuit, l'une quelque temps après l'équinoxe du printemps, l'autre au début de l'été, vers l'époque du solstice.

Dans le premier de ces paysages saturniens (fig. 183), le système annulaire forme une arche immense, interrompue par



Fig. 184. — Les anneaux vus de Saturne, à une latitude de 28°. Vue idéale, à minuit, vers l'époque des solstices saturniens.

un large vide au sommet. Le ciel est visible à travers l'étroite rainure qui sépare les deux anneaux principaux. Il apparaît aussi au-dessous de l'arche. Quant à l'interruption du sommet, elle est produite par l'ombre que projette Saturne dans l'espace, et ne se distingue du reste du ciel que par l'absence des étoiles. Il est possible, d'ailleurs, que cette portion éclipsée des anneaux soit quelquefois rendue visible par la réfraction des rayons solaires dans l'atmosphère de la planète. Peut-

être la bande éclipsée prend-elle, sur les bords de l'ombre, une teinte colorée, analogue à la nuance rougeâtre de la Lune pendant les éclipses totales.

Le second paysage idéal (fig. 184) laisse voir l'anneau extérieur dans son entier : l'ombre de Saturne n'atteint, aux solstices, que les anneaux intérieurs.

Il faut ajouter qu'aux autres heures de la nuit, la position de l'ombre n'est pas la même. Elle n'occupe plus le milieu de l'arc. Il résulte de là qu'après le coucher du Soleil, c'est la portion occidentale qui apparaît la première. Peu à peu, à mesure que la nuit augmente, l'arc occidental diminue; l'autre portion apparaît à l'Orient, jusqu'à ce qu'il y ait égalité à minuit entre les longueurs des deux arcs. A partir de minuit, la portion occidentale diminue encore et finit par disparaître, tandis que l'arc oriental augmente de longueur.

Qu'on ajoute à l'étrange beauté de ce spectacle la présence des satellites offrant des phases diverses, les uns dans leur plein, les autres à l'état de nouvelles lunes, d'autres dans leurs décours, et l'on se fera une idée de la variété d'aspect des nuits de Saturne.

Pendant la période des saisons hivernales, les anneaux présentent leurs faces obscures et ne sont visibles. pendant la nuit, que négativement, c'est-à-dire par l'absence des étoiles sur toute la zone céleste qu'ils recouvrent. Cependant, vers le matin et vers le soir, ils peuvent réfléchir la lumière que leur envoie la moitié lumineuse de Saturne ; à l'Orient et à l'Occident, ils se montrent sans doute comme une lueur légère, semblable à la lumière cendrée de la Lune, ou encore à la lumière zodiacale.

Mais si les nuits d'hiver sont privées de la lumière des anneaux, les journées de la même saison offrent, en revanche, les plus curieux phénomènes. La rotation diurne, en faisant mouvoir en apparence le Soleil selon des arcs circulaires, tantôt plus, tantôt moins élevés sur l'horizon, est cause que

l'astre radieux subit, lorsqu'il passe derrière les anneaux, de longues et fréquentes éclipses. A la vérité, la durée de ces phénomènes est moindre qu'on ne l'avait supposé d'abord, parce que la courbe apparente décrite par le Soleil n'étant pas parallèle aux arcs des anneaux, cet astre, éclipsé dès son lever, reparaît à travers le vide qui les sépare pour disparaître encore. C'est à 23° de latitude que les anneaux produisent



Fig. 185. — Vue idéale d'une phase de Saturne, prise d'un point de la surface des anneaux.

les éclipses solaires les plus prolongées. Pendant la durée de dix années terrestres, ces éclipses se succèdent continuellement avec deux interruptions de durées relativement courtes, et pendant une longue série de rotations de Saturne, le Soleil reste complétement invisible. Plus près de l'Équateur ou plus près du pôle, les éclipses solaires sont encore très-fréquentes, mais leur durée est de moins en moins considérable.

Si l'on juge de la perte de la lumière par l'intensité de l'ombre que projette l'anneau sur le disque de Saturne, les nuits artificielles produites par ces éclipses sont sans doute fort

obscures, bien que la réfraction atmosphérique empêche qu'elles soient absolues, en donnant lieu à une lumière crépusculaire.

Pour un observateur placé sur les anneaux, le spectacle du ciel serait bien différent. A moins de le supposer sur la tranche, dans le sens de l'épaisseur, il verrait une longue nuit de quinze ans succéder à un jour de même durée.

Pendant la période d'illumination de chacune des faces des

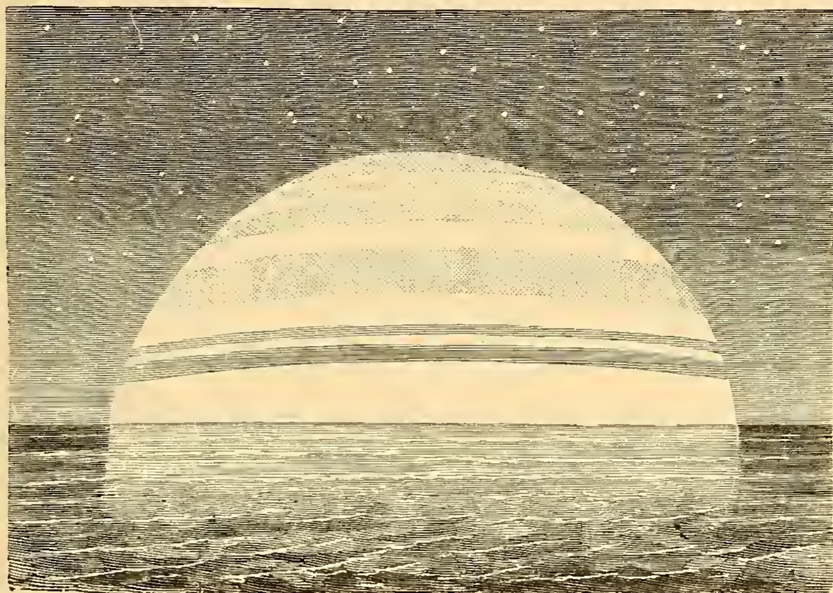


Fig. 186. — Le globe de Saturne. Vue idéale prise d'un point de l'anneau.

anneaux, le Soleil est éclipsé toutes les dix heures et demie. Ces éclipses, dues à l'interposition du disque de Saturne, produisent des nuits partielles dont la durée varie entre une heure et demie et deux heures, pour une grande partie de la largeur des anneaux. Ce sont les mêmes phénomènes qui causent l'échancrure de l'arc lumineux vu de Saturne, telle que la représentent à deux époques diverses nos deux vues idéales. Mais pendant près de quinze autres années, la même face des anneaux est entièrement privée de la lumière du Soleil. Cette

longue nuit est en partie compensée par la lumière qu'envoie l'hémisphère éclairé de Saturne, ou du moins la partie visible de cet hémisphère. A chaque période de dix heures et demie, l'immense globe apparaît sous des phases diverses. C'est d'abord un point lumineux qui grandit à l'horizon, en prenant de plus en plus la forme d'un demi-croissant (fig. 185), mais beaucoup moins recourbé que celui de la Lune. Au bout de cinq heures un quart, c'est à peu près un demi-cercle qui embrasse à lui seul la huitième partie de toute la voûte céleste, et dont la surface est ainsi de plus de vingt mille fois celle du disque lunaire (fig. 186). Sur ce disque, on aperçoit une zone obscure, divisée par une ligne lumineuse : c'est l'ombre projetée par les anneaux sur la planète. Les autres bandes brillantes et obscures, et sans doute beaucoup de détails physiques, que nous ne pouvons voir à l'énorme distance où nous sommes de Saturne, distinguent les diverses parties de ce disque immense.

Plus on s'éloigne de l'anneau intérieur, plus la portion visible de la planète grandit; mais ses dimensions apparentes diminuent au contraire avec la distance, sans cesser d'être considérables. Les figures 185 et 186 donneront une idée de l'aspect de Saturne, vu d'un point pris sur l'anneau intermédiaire, à deux époques qui diffèrent entre elles d'environ trois heures[1].

1. Dans ces deux vues idéales, comme dans les deux précédentes, nous avons donné au sol de Saturne, comme à celui des anneaux, une structure tout imaginaire. Sans doute, si la surface de la planète est solide, elle est sillonnée d'aspérités considérables; mais, comme l'observation ne donne rien, nous avons dû rester dans le vague qu'elle exige. Nous avons supposé le sol de l'anneau liquide. On a fait cette hypothèse; mais, en vérité, nous avons vu qu'on ne sait rien à cet égard, et je me hâte de le rappeler au lecteur, pour qu'il ne se fasse point une fausse idée des connaissances des astronomes à ce sujet. Enfin, nous supposons dans nos paysages une atmosphère analogue à l'atmosphère terrestre, ce qui est très-vraisemblable, mais enfin hypothétique. Quant aux formes apparentes des anneaux et des phases de la planète, elles sont construites avec exactitude. C'était ici, à vrai dire, le seul point essentiel.

IX

URANUS ♅.

DÉCOUVERTE D'URANUS, MOUVEMENTS, DISTANCES AU SOLEIL ET A LA TERRE. LES SATELLITES.

Le monde solaire connu des anciens comprenait tous les corps célestes dont nous venons d'étudier les mouvements et la constitution physique, à l'exception des petites planètes et des satellites de Jupiter et de Saturne. Il y a un siècle, le nombre des planètes n'avait point augmenté, et les confins du système ne s'étendaient pas au delà de Saturne. Il était donné au plus fécond et au plus ingénieux observateur des temps modernes, à l'illustre William Herschel, de doubler le rayon de la sphère qui embrasse les astres soumis à l'attraction du Soleil, en découvrant une planète nouvelle, la planète Uranus.

C'est le 13 mars 1781, entre dix et onze heures du soir, qu'Herschel, occupé à explorer avec son télescope la constellation des Gémeaux, y découvrit une étoile dont le diamètre considérable fixa son attention. Il reconnut bientôt que le nouvel astre se déplaçait, et le prit d'abord pour une comète. Les observations, soumises au calcul par les géomètres, finirent par démontrer qu'il s'agissait là d'un corps dont la grande distance au Soleil et l'orbite presque circulaire ne pouvaient

laisser de doute sur sa nature : c'était bien une véritable planète.

Uranus a le plus souvent — cela dépend de sa distance à la Terre — l'éclat d'une étoile de sixième grandeur. Il est donc quelquefois visible à l'œil nu. C'est là du reste une petitesse toute relative, qui tient à l'immense distance de la planète au Soleil et par suite à la Terre, et à la faible intensité de la lumière que le premier de ces astres lui envoie. Mais si l'on examine le point lumineux avec une lunette d'un fort pouvoir grossissant, la forme circulaire du disque apparaît avec netteté, et son diamètre apparent devient susceptible de mesure.

L'orbite décrite par Uranus autour du Soleil enveloppe l'orbite de la Terre à une si grande distance, qu'il est impossible d'apercevoir dans le disque de la planète aucune apparence de phases. Elle tourne pour ainsi dire toujours vers nous sa moitié éclairée.

L'orbite d'Uranus a une excentricité presque égale à celle de Jupiter (0.0466), de sorte que, pendant tout le cours de sa révolution qui dure environ 84 ans, — plus exactement 30 686 jours $\frac{8}{10}$, — la distance d'Uranus au Soleil varie sans cesse, s'élevant au maximum à 742 millions de lieues, au minimum à 675 millions, en moyenne à 710 millions. C'est, on le voit, une différence de 68 millions de lieues environ entre ses distances extrêmes, entre l'aphélie et le périhélie d'Uranus.

Son éloignement de la Terre varie plus encore ; il est le plus grand possible, lorsque les deux planètes sont de part et d'autre et à l'opposé du Soleil ; le plus faible, au contraire, si les deux planètes se trouvent du même côté de l'astre central. Dans le premier cas, Uranus est en conjonction, et sa distance à la Terre peut s'élever jusqu'à 775 millions de lieues, tandis que dans les oppositions cette distance peut descendre à 640 millions.

Son diamètre apparent, vu de la Terre, varie alors dans une proportion qui est figurée dans le dessin suivant (fig. 187).

De la distance d'Uranus et de ses dimensions apparentes, on a conclu ses dimensions réelles, qui en font un corps sphéroïdal 74 fois ½ aussi volumineux que notre Terre, le diamètre de notre globe étant 4 fois et un cinquième moindre que celui d'Uranus (4.2085). C'est 13 400 lieues environ pour le diamètre, 42 250 lieues pour la périphérie de la planète. La

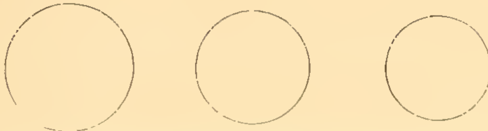


Fig. 187. Variations du diamètre apparent d'Uranus, à ses distances extrêmes et à sa distance moyenne de la Terre.

figure 188 montre les grosseurs comparées d'Uranus et de la Terre.

Les astronomes ne sont pas d'accord sur la question de savoir si le globe d'Uranus est parfaitement sphérique ou s'il est aplati à ses pôles de rotation. W. Herschel affirmait ce dernier fait, et Mædler a déterminé, il y a quelques années, un aplatissement d'un dixième, qui laisserait supposer une grande vitesse dans le mouvement de rotation d'Uranus sur son axe. D'autres astronomes, tels qu'Otto Struve, n'ont pu constater d'aplatissement sensible. Mais ce fait n'est peut-être pas en contradiction avec les observations de Mædler et d'Herschel, et voici pourquoi. Il suffirait, comme le remarque Arago[1], de supposer par analogie que l'équateur d'Uranus coïncide à peu près avec les plans des orbites de ses satellites, pour expliquer comment il a pu se faire qu'à des époques différentes les

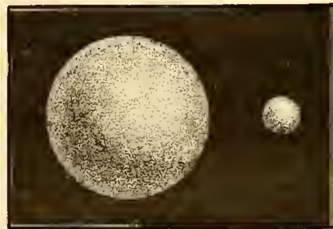


Fig. 188. Uranus et la Terre dimensions comparées.

1. *Astronomie populaire*, IV, 493.

observateurs soient arrivés à des résultats différents. L'axe de rotation de la planète serait alors presque couché sur l'orbite de la Terre ; si cet axe est tourné vers notre globe, l'ellipsoïde nous semblera circulaire ; s'il est dans une direction rectangulaire avec la première, il apparaîtra sous la forme d'un disque aplati. La figure 189 explique clairement et la différence de position et celle qui en résulte pour la forme apparente du disque. D'après les observations faites en 1870, 1871 et 1872, par M. W. Buffham, ce savant serait parvenu à constater l'ellipticité du disque d'Uranus, et l'existence de taches brillantes, ainsi que d'une ligne sombre voisine du

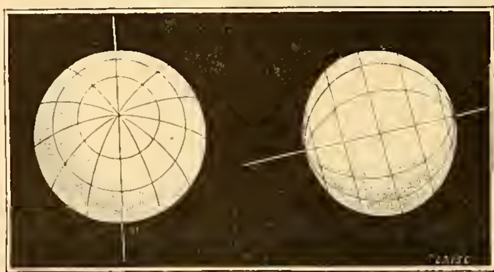


Fig. 189. Apparences d'un globe aplati vu dans deux directions rectangulaires.

centre du disque ; du mouvement des taches, cet observateur a cru pouvoir déduire une durée de rotation de 12 heures, l'axe de la planète étant incliné de 80° sur l'orbite ; le sens du mouvement de rotation serait direct. Mais ces observations nous paraissent trop incertaines encore pour ne pas avoir besoin de confirmation.

Je viens de parler des satellites d'Uranus. Uranus est en effet le centre d'un petit monde, peuplé comme celui de Saturne, outre la planète principale, de 4 lunes ou satellites qui tournent dans des plans à peu près perpendiculaires au plan de l'orbite. Ces quatre corps dont les révolutions durent depuis 2 jours 1/2 pour le plus rapproché, jusqu'à 13 jours 1/2 environ pour le plus éloigné d'Uranus, compensent peut-être,

pendant les nuits de la planète, par la réflexion de leur lumière, la faible intensité de la lumière qui éclaire ses jours. Le Soleil en effet n'apparaît, dans Uranus, que comme un faible disque dont l'étendue superficielle est 370 fois moindre que celle du disque solaire vu de la Terre. La lumière et la chaleur y arrivent donc réduites dans une pareille proportion, c'est-à-dire 370 fois moindres que les nôtres.

Nous donnons ici les dimensions relatives des orbites des quatre satellites, supposées rabattues sur le plan de l'orbite de la planète centrale. J'ai dit qu'en réalité, leurs mouvements s'effectuent dans une direction perpendiculaire à ce plan. Une autre particularité, unique dans le système solaire, distingue

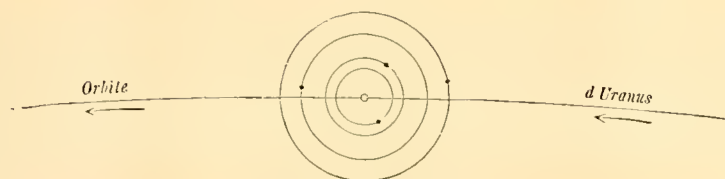


Fig. 190. Système des quatre satellites d'Uranus ; orbites projetées sur le plan de l'orbite de la planète.

encore le monde d'Uranus : le sens des mouvements des satellites y est rétrograde, c'est-à-dire inverse de celui de tous les mouvements connus des satellites et des planètes. Cette anomalie tient peut-être à la même cause que la très-grande inclinaison des orbites. Voici les noms, les distances au centre d'Uranus et les durées des révolutions de ces quatre corps célestes[1] :

	Distances en rayons d'Uranus.	Distances en kilomètres.	Durées des révolutions.		
Ariel.	7.44	197 000	2j	12h	28m
Umbriel	10.37	275 000	4	3	27
Titania	17.01	450 000	8	16	52
Oberon	22.75	600 000	13	11	6

1. On a cru quelque temps à l'existence de huit satellites d'Uranus; deux ayant été découverts par W. Herschel auraient décrit des orbites beaucoup plus étendues que les quatre satellites dont nous venons de parler. Les deux autres auraient été compris entre le second et le troisième, et entre celui-ci

Des variations dans l'intensité lumineuse de ces corps, si difficiles à observer à cette énorme distance, ont fait croire à des mouvements de rotation que l'analogie d'ailleurs porte facilement à admettre, mais qui sont jusqu'ici purement hypothétiques. On ne sait rien de plus positif sur leurs passages dans l'ombre projetée par Uranus, sur leurs éclipses et sur celles du Soleil qui doivent résulter de leurs passages devant le disque de ce dernier corps. On peut présumer cependant qu'il y a dans ces phénomènes, comme dans les phases des satellites, leur présence simultanée ou leur absence au milieu du ciel des nuits d'Uranus, une grande variété d'apparences pour la planète centrale du système : c'est comme une répétition du monde de Jupiter.

Quant à la constitution physique d'Uranus, les observations restent à peu près muettes jusqu'à présent. Aucune particularité du disque n'est visible à une telle distance ; cependant M. Lassell, en 1862, a distingué une ligne sombre qui paraît avoir été revue dix ans plus tard, par M. W. Buffham, avec quelques autres taches brillantes et mobiles, ainsi qu'on l'a vu plus haut. Les calculs astronomiques nous renseignent seulement sur la masse, qui est quinze fois celle de la Terre, de sorte qu'en tenant compte du volume, on ne trouve pour la densité de la matière qui compose le globe d'Uranus que le sixième environ de celle de la Terre : c'est un peu plus de la densité de la glace.

La lumière d'Uranus est généralement d'un bleu pâle, d'après le cap. W. Noble, qui résume ainsi les souvenirs de

et le quatrième. Mais on n'a revu positivement ni les uns ni les autres. Les quatre satellites aujourd'hui reconnus ont été baptisés des noms d'*Ariel*, *Umbriel*, *Titania* et *Oberon*. M. Lassell, qui a étudié avec une grande attention la planète Uranus et qui en a exploré les alentours avec un télescope d'une grande puissance et dans les meilleures conditions atmosphériques, regarde les quatre satellites ainsi nommés comme étant les seuls dont l'existence soit bien prouvée. J. Herschel, dans la 6e édition de ses *Outlines of astronomy*, adopte cette opinion, qui paraît fort vraisemblable.

ses impressions visuelles, pour 18 années d'observations faites à des intervalles inégaux. Cependant, cet observateur a cru remarquer, en mars 1875, une altération dans la couleur de la planète, couleur devenue plus brillante, plus blanche et même légèrement jaunâtre, tellement tout vestige de la nuance bleue avait disparu. M. Vogel a fait l'analyse de cette lumière, trop faible pour qu'on y distingue les raies de Fraunhofer. Le spectre d'Uranus lui a présenté plusieurs bandes sombres. « Il est hors de doute que ces bandes, dit-il, résultent de l'absorption des rayons solaires dans une atmosphère enveloppant cette planète..., une des bandes coïncide exactement avec une bande des spectres de Jupiter et de Saturne. » Ces indices, bien faibles encore, marquent toutefois entre les trois planètes une certaine analogie de constitution.

A la surface d'Uranus, la pesanteur agit avec une intensité légèrement plus forte (d'un 20me) qu'à la surface de la Terre, de sorte que les conditions d'équilibre et de mouvement des corps y sont à peu près les mêmes qu'à la surface de notre globe. Notons toutefois cette différence, que les couches superficielles d'Uranus ont sans doute une grande légèreté spécifique.

X

NEPTUNE ♆.

DÉCOUVERTE DE NEPTUNE. — ÉLÉMENTS DE L'ORBITE. — SATELLITE.

A une distance moyenne du Soleil, d'un milliard 110 millions de lieues, c'est-à-dire de plus de trente fois le rayon de l'orbite de la Terre, circule la plus éloignée des planètes connues du monde solaire. L'orbite presque circulaire qu'elle décrit autour du foyer commun est si étendue, que la planète ne met guère moins de 165 ans à accomplir sa révolution totale.

Cette planète est Neptune. Trente ans à peine nous séparent de l'époque où elle a été vue pour la première fois, de sorte qu'elle n'a encore parcouru sous nos yeux qu'un peu plus de la sixième partie de son orbite. La date récente de sa découverte et l'immense éloignement où la planète se trouve de la Terre expliquent donc aisément le peu de données qu'on possède sur Neptune. Mais un autre genre d'intérêt vient en partie compenser cette insuffisance : je veux parler de la méthode même qui a servi de base à la découverte de la planète, et qui en fait jusqu'à présent un objet unique dans les annales de l'astronomie.

On sait que parmi les corps, aujourd'hui connus, dont l'ensemble forme le système solaire, huit seulement avaient été

distingués par les anciens de la multitude des points brillants qui parsèment la voûte céleste; les dimensions des uns, le Soleil, la Lune et la Terre, le mouvement propre des autres, Mercure et Vénus, Mars, Jupiter et Saturne au milieu des constellations, furent les caractères particuliers de cette distinction. Plus tard, le télescope agrandit le champ de la vision de l'homme et permit à l'astronomie moderne de joindre au groupe de ces huit astres un nombre assez considérable d'astres nouveaux. Uranus, les petites planètes, les satellites de Jupiter, de Saturne et d'Uranus furent successivement rangés dans la famille primitive. Mais, pour découvrir tous ces corps célestes, quelle fut la méthode employée? Une attentive et minutieuse révision de toutes les parties du ciel étoilé, la comparaison des cartes célestes et du champ d'un instrument d'optique, la reconnaissance fortuite du déplacement d'un point lumineux. Dans tout cela, nulle prévision fondée sur la théorie, aucune idée préconçue sur la future découverte, due au zèle persévérant des chercheurs et à d'heureux hasards.

La méthode qui a présidé aux recherches et à la reconnaissance définitive de Neptune fut tout autre.

Je dirai plus loin quels sont les principes des mouvements des astres autour de leurs foyers de révolution, comment ils agissent et réagissent les uns sur les autres, de manière à troubler la régularité de leurs mouvements, comment les perturbations observées se rattachent aux lois mêmes qui le régissent. Or, dans le nombre de ces perturbations, il en était dont l'explication théorique ne semblait pas possible, et que les astronomes avaient essayé en vain de rattacher aux influences des corps célestes connus. Les tables construites pour la planète Uranus ne s'accordaient point avec les observations, et la marche de cet astre était troublée par une cause inconnue.

Cette cause était néanmoins depuis quelque temps soupçonnée par Bouvard, l'astronome qui avait calculé les tables

d'Uranus. Mais la solution complète du problème fut l'œuvre d'un savant aujourd'hui célèbre, de M. Le Verrier[1]. C'est à lui que revient l'honneur d'avoir déterminé par des calculs, tout entiers basés sur la théorie de la gravitation universelle, les éléments approximatifs d'une planète jusqu'alors inconnue, à l'action de laquelle il fallait attribuer les anomalies apparentes de la marche d'Uranus : « M. Le Verrier, dit Arago, a aperçu le nouvel astre sans avoir besoin de jeter un seul regard vers le ciel; il l'a vu au bout de sa plume; il a déterminé par la seule puissance du calcul la place et la grandeur approximatives d'un corps situé bien au delà des limites jusqu'alors connues de notre système planétaire, d'un corps dont la distance au Soleil surpasse 1100 millions de lieues, et qui, dans nos puissantes lunettes, offre à peine un disque sensible. Ainsi, la découverte de M. Le Verrier est une des plus brillantes manifestations de l'exactitude des systèmes astronomiques modernes. Elle encouragera les géomètres d'élite à chercher avec une nouvelle ardeur les vérités éternelles qui restent cachées, suivant une expression de Pline, dans la majesté des théories. » Le résultat des recherches théoriques de M. Le Verrier fut publié le 31 août 1846. Moins d'un mois après, le 23 septembre, un astronome de Berlin, M. Galle, découvrit Neptune à peu de distance de la position assignée.

Neptune est invisible à l'œil nu. Il a, dans les télescopes, l'aspect d'une étoile de huitième grandeur. Son mouvement apparent est d'une lenteur extrême (21″.55 par jour). Il ne

1. Il est juste de dire, pour échapper à tout reproche de partialité à ce sujet, qu'un géomètre anglais d'un mérite incontesté, M. Adams, avait abordé, en même temps que M. Le Verrier, le grand problème de mécanique céleste dont il s'agit. Ses conclusions étaient à peu de chose près les mêmes, et, de la part des deux savants géomètres, le mérite est égal. Mais le travail de M. Adams n'ayant été publié qu'après la découverte de l'astre, n'eut pas naturellement le même retentissement. Une telle coïncidence est d'ailleurs un témoignage de plus à joindre en faveur de la perfection des théories astronomiques et de la puissance du calcul.

met pas moins de 60 127 jours à accomplir l'une de ses révolutions sidérales ; c'est à peu près 165 ans. Depuis l'époque de sa découverte, Neptune n'a pas encore parcouru le cinquième de l'orbite qu'il décrit autour du Soleil. Cette courbe offre l'immense développement de près de 7 milliards de lieues, de sorte que la vitesse réelle de la planète est d'environ 464 000 kilomètres par jour ou de $5^k.4$ par seconde. C'est naturellement la plus faible des vitesses planétaires connues.

Comme toutes les autres planètes, Neptune se trouve tantôt plus rapproché, tantôt plus éloigné de la Terre. A l'époque de ses conjonctions, il peut se trouver distant de nous de 1180 millions de lieues, tandis que sa distance minimum, dans les oppositions, peut s'abaisser à 110 millions de lieues au-dessous de la première. Ses dimensions apparentes varient donc en sens inverse de ces distances, et la figure 191 montre entre quelles limites oscille le diamètre de son disque[1].

Quant aux dimensions réelles, elles sont assez considérables, et font de Neptune la troisième planète du système solaire, dans l'ordre de la grosseur. Son diamètre apparent mesure en effet 2″.6 à sa distance moyenne de la Terre. A la distance 1 il deviendrait 78″.10 ; par conséquent, le diamètre réel est 4.387 fois aussi grand que le diamètre de la Terre ; il mesure 14 000 lieues de 4 kilomètres, ce qui donne à la périphérie une longueur de 44 000 lieues. La surface du globe de Neptune est plus de 19 fois celle de la Terre, et son volume 84 fois le volume de celle-ci.

En se rapportant à la figure 4, page 32, on voit à quelle faible dimension se réduit le diamètre apparent du Soleil, vu de la distance de Neptune. L'intensité de la chaleur et de la lumière reçues par cette planète n'est plus, à cette distance

1. Ce disque n'a offert jusqu'ici aucune trace sensible d'aplatissement. On n'y peut non plus distinguer aucune tache, de sorte que la durée de la rotation de Neptune reste inconnue.

énorme, que la millième partie de la chaleur et de la lumière reçues par la Terre. Mais comme on ne sait rien des conditions physiques et atmosphériques, ni de la rotation de Neptune, il n'est permis d'en rien conclure sur l'état climatérique de la planète.

A une distance à peu près égale à celle de la Lune à la Terre, c'est-à-dire de 100 000 lieues environ, un satellite décrit autour de Neptune[1], en 5 jours 21 heures, une orbite circulaire qui a permis aux géomètres de calculer la masse de la planète centrale. Cette masse, égale à environ la dix-sept mille cinq centième partie de celle du Soleil, équivaut à 18 fois 1/2 la masse de la Terre. De là, pour la matière qui compose le globe de Neptune, une densité qui ne surpasse guère le cinquième de la densité moyenne de la Terre; rapportée à la densité de l'eau, elle est égale à 1.15. C'est, à peu de chose près, le poids spécifique du succin, un peu plus que celui de l'eau de la mer et un peu moins que celui de la houille. Mais si, comme il est présumable, la densité des couches va en croissant de la surface au centre, il en résulte que les couches



Fig. 191. Dimensions apparentes de Neptune à ses distances extrêmes et à sa moyenne distance de la Terre.

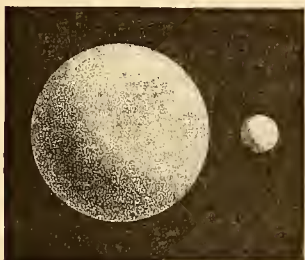


Fig. 192. Neptune et la Terre; dimensions comparées.

1. Cette découverte est due à l'astronome Lassell, qui a cru voir plus tard un second satellite. Comme ce dernier astre n'a point été revu, nous ne le mentionnons que pour mémoire. Des observateurs ont cru reconnaître aussi que Neptune est entouré d'un anneau; mais il est aujourd'hui certain que cette apparence, qui s'était déjà présentée pour Uranus, doit être considérée comme une illusion d'optique.

M. Lassell nous écrit de Malte, où il a fait à l'aide de son magnifique télescope de si intéressantes observations, que, dans sa pensée, le second satellite de Neptune n'a pas plus d'existence réelle que l'anneau supposé.

superficielles doivent être plus légères encore. Le spectre de Neptune, étudié par M. Vogel, a paru à ce savant différer essentiellement du spectre solaire ; « son très-faible éclat, dit-il, ne permet pas d'y reconnaître les raies de Fraunhofer, ni de mesurer avec exactitude la place des bandes obscures. Il semble néanmoins ressortir de ces mesures que le spectre de

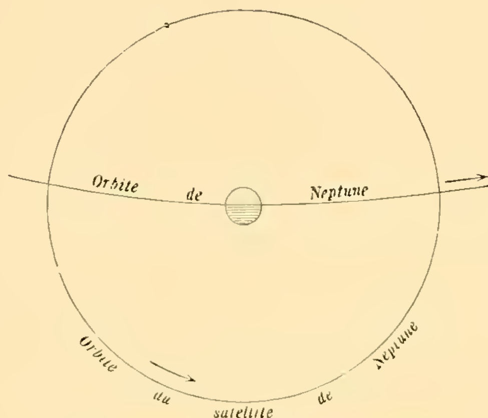


Fig. 193. Orbite du satellite de Neptune.

Neptune est identique à celui d'Uranus. » Quant à la pesanteur à la surface de la planète que nous venons d'étudier, elle est un peu moins forte qu'à la surface de la Terre (environ les 953 millièmes). Un corps, dans la première seconde de sa chute, parcourrait donc sur Neptune, s'il tombait dans le vide, une distance égale à $4^{m}.674$; sa vitesse acquise serait, à cet instant, $9^{m}.348$.

COUP D'ŒIL D'ENSEMBLE

SUR LE MONDE PLANÉTAIRE

A la planète Neptune se termine, dans l'état actuel des connaissances astronomiques, le système du monde planétaire, mais non pas, tant s'en faut, la sphère d'attraction du Soleil. D'autres corps célestes ou des agrégations de matière imparfaitement condensée circulent encore dans les mêmes régions; mais comme les uns et les autres se distinguent profondément des planètes, il était nécessaire d'en faire un groupe distinct de celui que nous venons d'étudier et de décrire.

Avant de quitter le monde planétaire proprement dit, on peut se demander si les orbites de Mercure et de Vénus forment bien ses limites réelles, s'il n'y a pas entre Mercure et le Soleil une ou plusieurs planètes, que leur proximité des rayons de l'astre a empêché jusqu'ici d'apercevoir; si, au delà de Neptune, il n'existe pas aussi d'autres planètes que leur éloignement et la lenteur de leur mouvement propre ont fait échapper jusqu'à ce jour aux regards des astronomes.

En ce qui regarde les planètes plus éloignées que Neptune, on n'a pu faire encore que des hypothèses entièrement con-

jecturales. Ni l'observation directe, ni la théorie n'ont fourni aucun élément du problème. Les observations de Neptune, faites depuis 1846, époque de la découverte réelle, paraissent jusqu'ici absolument conformes à la théorie ; elles ne révèlent aucune perturbation qu'on puisse mettre sur le compte d'une planète inconnue.

Il n'en est pas de même de la question posée, il y a longtemps déjà, sur l'existence de planètes plus rapprochées du Soleil que Mercure, ou *intra-mercurielles*, selon l'expression consacrée. Un assez grand nombre d'observations, faites depuis un peu plus d'un siècle, se rapportent toutes au passage, devant le disque solaire, de points noirs de forme arrondie, dont le mouvement a paru totalement différent de la rotation des taches du Soleil. De tels passages ne sont-ils pas l'indice de l'existence d'une ou plusieurs planètes inconnues? Jusqu'en 1859, la question resta indécise ; mais à cette époque, la publication des travaux de M. Le Verrier sur les planètes inférieures, coïncidant avec une observation fort précise due à un médecin français, M. le Dr Lescarbault, d'Orgères, fit croire un instant à une solution. Cet observateur avait vu, le 26 mars 1859, et suivi pendant 77 minutes le passage d'un corps noir de forme ronde sur le disque solaire. De son côté, M. Le Verrier venait d'être conduit, par la constatation d'inégalités séculaires dans le mouvement de Mercure, à admettre qu'il existe quelque matière, planète ou anneau d'astéroïdes, entre Mercure et le Soleil[1].

1. Les observations des passages de Mercure sur le Soleil ont indiqué un déplacement progressif du périhélie de cette planète, qui s'élève à 38″ par siècle. Cette perturbation séculaire, M. Le Verrier en a cherché la cause, et ce ne peut être, selon lui, que l'effet de « l'attraction d'une planète intra-mercurielle, ou plutôt d'un groupe d'astéroïdes placés entre le Soleil et Mercure. Distribués sur un anneau, ces astéroïdes produiraient bien un mouvement progressif du périhélie, tandis que les actions périodiques se détruiraient. »

« Le déplacement du périhélie, dit encore ailleurs M. Le Verrier, est

L'observation de M. Lescarbault fut naturellement considérée comme une vérification de la prévision théorique, et l'on attendit des confirmations ultérieures de cette intéressante coïncidence. La planète Vulcain — c'est le nom dont on la baptisa — fut donc attentivement cherchée, mais sans succès, lorsque, il y a aujourd'hui un mois, une observation nouvelle, faite à Péckeloh par M. Weber le 4 avril 1876, et signalée par M. R. Wolf, souleva de nouveau la question. Toutes les observations antérieures, au nombre de plus de trente, furent passées en revue, discutées et comparées. Cinq ont paru à M. Le Verrier se rapporter à un même astre qui serait décidément la planète Vulcain :

12 mars 1849, J. Sidebotham.	10 octobre 1802, Fritsch.
26 mars 1859, D[r] Lescarbault.	2 octobre 1839, Decuppis.
20 mars 1862, Lummis.	

La nouvelle planète décrivant une orbite presque circulaire, aurait pour moyenne distance au Soleil, 0.205, un peu plus du 5[me] de celle de la Terre, et pour période de révolution 33 jours 0225.

Revenons aux dimensions actuelles du système planétaire. Le diamètre de l'orbite de Neptune peut être considéré comme celui d'une sphère embrassant le monde

l'indice le plus sûr, quand il doit être augmenté, de l'existence d'une matière cosmique encore inconnue, et circulant comme les autres corps autour du Soleil. Peu importe que cette matière soit agglomérée en une seule masse, ou disséminée en une foule d'astéroïdes indépendants les uns des autres. Pourvu que ses parties circulent toutes dans le même sens, leurs effets s'ajoutent entre eux pour imprimer au périhélie un mouvement direct. La conséquence est très-claire. Il existe dans les environs de Mercure, entre la planète et e Soleil sans doute, une matière jusqu'ici inconnue. Consiste-t-elle en une ou plusieurs petites planètes ou bien en des astéroïdes ou même en des poussières cosmiques? La théorie ne peut prononcer à cet égard. A de nombreuses reprises, des observateurs dignes de foi ont déclaré avoir été témoins du passage d'une petite planète sur le Soleil; mais on n'est parvenu à rien coordonner sur ce sujet. »

(*Remarques sur l'ensemble des théories des huit planètes principales.*)

planétaire dans son ensemble; or, il est égal à 60 fois la distance du Soleil à la Terre, ou à 8 milliards 890 millions de kilomètres. Telles sont les dimensions diamétrales du système. La lumière mettrait à le traverser de part en part 8 heures et 17 minutes; un boulet de canon, qui conserverait une vitesse uniforme de 450 mètres par seconde, ferait cet immense trajet en 626 ans; il faudrait 845 ans à une onde sonore. L'épaisseur du monde planétaire est beaucoup plus petite. En l'évaluant dans un sens perpendiculaire au plan de l'orbite de la Terre, elle est de 19 à 20 fois moindre que l'étendue diamétrale, c'est-à-dire égale à 470 millions de kilomètres environ. Si toute la matière du Soleil et des planètes était uniformément répartie dans la sphère qui s'étend jusqu'à Neptune, sphère dont le volume équivaut à 338 quatrillions de fois le volume du globe terrestre, la densité de l'espace supposé homogène, ainsi rempli, serait environ un demi-trillionième de la densité de l'eau ; l'hydrogène, le plus léger des gaz connus, serait donc plus de 400 millions de fois aussi dense.

Les planètes aujourd'hui connues se rangent naturellement, nous l'avons dit, en trois groupes qui se distinguent les uns des autres par des caractères assez nettement tranchés, comme aussi les corps célestes de chacun de ces groupes ont entre eux de nombreuses similitudes. Entrons à ce sujet dans quelques détails.

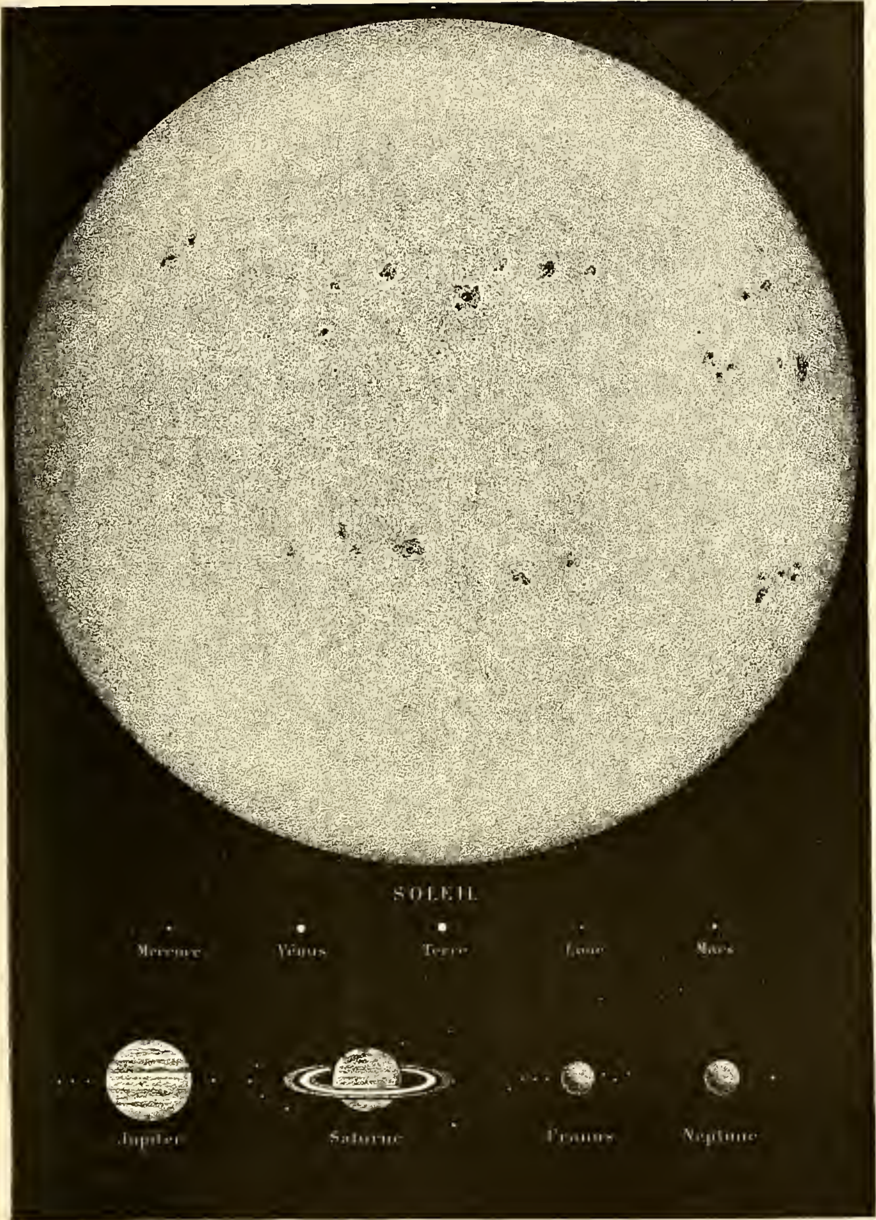
Le groupe des *planètes moyennes*, c'est-à-dire de moyenne grosseur, comprend Mercure, Vénus, la Terre et Mars : ce sont les quatre planètes les plus rapprochées du Soleil. Au contraire, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, de beaucoup les plus volumineuses, et qui pour cela forment le groupe des *grosses planètes*, sont les plus éloignées du foyer du monde solaire. Enfin, dans une région intermédiaire et qui, avant le dix-neuvième siècle, semblait former une lacune dans la succession des corps circulant autour du Soleil, se trouve la ré-

gion innombrable des *petites planètes* aux orbites entrelacées et qui toutes sont remarquables par leur petitesse. On peut juger d'un coup d'œil, en examinant la planche XXV, où le Soleil et les planètes sont représentés dans leurs vraies dimensions relatives (à l'exception des petites planètes qui eussent été invisibles à cette échelle), si ce premier caractère suffit à différencier les groupes. Quant au Soleil, c'est de toutes façons l'astre prépondérant de tout le système. Son volume vaut plus de 600 fois les volumes réunis de toutes les planètes; et sa masse est relativement plus considérable encore : si le globe solaire était placé dans l'un des plateaux d'une balance, il faudrait mettre, dans l'autre plateau, 740 fois le poids de toutes les masses planétaires pour l'équilibrer.

Sous le rapport des masses et des densités, les trois groupes planétaires se distinguent encore nettement. En effet, voici comment les planètes se rangent à ce point de vue :

	Planètes.	Masses.	Densités.
Grosses planètes.	Jupiter	309.028	0.243
	Saturne	92.394	0.133
	Neptune	15.771	0.211
	Uranus	18.542	0.220
Petites planètes		Insensibles.	Inconnues.
Planètes moyennes.	La Terre	1.000	1.000
	Vénus	0.787	0.905
	Mars	0.109	0.692
	Mercure	0.075	1.376

Les masses réunies du premier groupe valent environ 220 fois les masses du troisième. Les densités, à peu de chose près égales entre elles dans chaque groupe, sont en moyenne quatre fois $\frac{1}{2}$ plus faibles dans le groupe des grosses planètes (0.211) que dans celui des planètes moyennes (0.948). La matière paraît donc, à l'origine, s'être divisée en portions plus petites dans le voisinage du Soleil que dans les régions éloignées du système, et, de plus, s'y être beaucoup plus condensée.



LE SOLEIL ET LES PLANÈTES

Dimensions comparées.

Les mouvements de rotation et la forme des globes planétaires, qui dépend en partie de la vitesse rotatoire, vont nous fournir de nouvelles analogies. Les planètes moyennes tournent sur leur axe en des temps presque égaux, à peu près en 24 heures, vitesse 25 fois 1/2 plus rapide que la vitesse de rotation du Soleil. Jupiter et Saturne tournent encore 2 fois 1/2 plus vite ; aussi la forme de leurs globes est-elle considérablement aplatie, tandis que celle des sphéroïdes constituant les planètes moyennes est beaucoup plus approchée de la sphère. Enfin, parmi ces dernières, seule notre Terre a un satellite, tandis que les grosses planètes en ont dix-sept à elles quatre et peut-être davantage. Est-ce là encore un caractère qui se rattache physiquement, à l'origine, à la plus grande vitesse du mouvement de rotation ? C'est probable.

Quant aux petites planètes, ce qui, outre leur faible volume individuel, les différencie des deux autres groupes, c'est beaucoup plus les éléments de leurs mouvements que leurs caractères physiques encore à peu près complétement inconnus. L'entrelacement de leurs orbites, la grande excentricité de la plupart de ces courbes, les fortes inclinaisons de leurs plans, voilà surtout, avec leur nombre considérable et leur accumulation en une région resserrée du monde solaire, ce qui empêche de les confondre aussi bien avec l'un qu'avec l'autre des deux groupes qu'elles séparent.

On a beaucoup agité la question de l'habitabilité des planètes du monde solaire. On s'est demandé si la Terre seule est embellie à sa surface par les productions de la vie animale et végétale, si elle est seule habitée par des êtres intelligents et sensibles. L'astronomie ne peut aborder que très-indirectement ces questions intéressantes, dont la solution restera probablement toujours dans le domaine des conjectures. Mais nous voyons avec quel soin minutieux cette science rassemble tous les éléments du problème, toutes

les données que l'observation peut fournir sur les conditions physiques et météorologiques propres à chacun des corps du monde solaire. En partant de ces données, encore bien insuffisantes, ce sont les planètes Mars et Vénus qui paraîtraient différer le moins de la Terre, et qu'on pourrait supposer, avec le moins d'invraisemblance, en possession d'une flore et d'une faune semblables à la faune et à la flore terrestres. Mais cette ressemblance n'est qu'une pure hypothèse; car une simple différence dans la constitution chimique des atmosphères, par exemple, peut la détruire. Quant aux grosses planètes, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, leur faible densité permet de croire que leurs couches superficielles sont à l'état fluide, d'où l'on pourrait induire qu'elles ne sont point parvenues encore à acquérir les conditions nécessaires à l'apparition de la vie à leur surface.

Sans doute, en s'en tenant aux vagues analogies, chères aux partisans des causes finales, il y a de fortes probabilités que quelques-unes des planètes et de leurs lunes sont habitées. Mais quel est le genre d'organisation des êtres végétaux et animaux qui les peuplent? C'est ce dont il est plus difficile encore de se faire une idée, dans l'état actuel de la science. D'ailleurs n'est-il pas probable que les âges des planètes sont fort différents, et que, même en supposant qu'elles ont dû ou doivent passer les unes et les autres par les mêmes phases géologiques, ces phases sont loin d'être les mêmes aux mêmes époques? On pourra donc longtemps encore écrire des volumes sur cette question, appuyer de semblants de raisons, basées sur des données scientifiques imparfaites, les hypothèses les plus hasardées : on ne sortira point pour cela du domaine des conjectures. Chacun, selon la tournure de son imagination, de ses convictions philosophiques ou de ses croyances religieuses, pourra toujours à son gré rejeter ou admettre de telles hypothèses.

LIVRE TROISIÈME

LES COMÈTES — LES ÉTOILES FILANTES LA LUMIÈRE ZODIACALE

I

LES COMÈTES

§ 1. LES ORBITES COMÉTAIRES.

Si l'on s'en rapporte à l'étymologie du mot, *comète* signifie astre *chevelu*. Le plus souvent, en effet, une comète apparaît comme une étoile dont le noyau lumineux est entouré d'une nébulosité plus ou moins brillante, à laquelle les astronomes anciens donnaient le nom de *chevelure*. Indépendamment de cette auréole vaporeuse, le noyau de l'astre est fréquemment accompagné d'une traînée dont la longueur varie d'une comète à l'autre ou pour une même comète : cette traînée lumineuse, cet appendice nébuleux est ce qu'on nomme la *queue* de la comète[1].

Mais ces caractères, qui suffiraient sans doute à faire dis-

1. Les Chinois donnent à la queue le nom un peu prosaïque de *balai* (*sui* ou *soui*). Aussi les comètes sont-elles pour eux les *balayeuses du ciel*. Cette métaphore un peu osée a le mérite de faire image.

tinguer les comètes des planètes, n'ont trait qu'à l'aspect physique, et ne sont pas d'ailleurs absolument applicables à toutes les comètes, puisqu'il en est qui n'ont pas de queue, que certaines planètes ont paru entourées de nébulosités analogues à la chevelure d'une comète, et qu'enfin nous décrirons bientôt sous le nom de nébuleuses et d'étoiles nébuleuses, des corps célestes qui ne peuvent être rangés dans la famille d'astres que nous allons étudier maintenant. Les comètes se distinguent surtout des planètes par la nature et les éléments de leurs orbites, qui sont telles qu'on peut regarder aujourd'hui comme démontrée l'assertion de Laplace : à savoir que, par leur origine, « les comètes sont étrangères au système planétaire. »



Fig. 194. Aspect général des comètes. Noyau, tête et queue, vus à l'œil nu.

Temporairement pour la plupart, d'une façon permanente pour un nombre de comètes plus restreint, ces astres se trouvent néanmoins faire partie du monde solaire. Les orbites qu'ils décrivent ont, comme les orbites planétaires, le Soleil pour foyer de leur mouvement, et les lois de ce mouvement sont identiquement les mêmes lois qui régissent les planètes dans leur circulation autour du foyer commun. Mais ce n'est pas du premier coup qu'on est arrivé à reconnaître aux comètes leur caractère de corps célestes, et jusqu'à Newton, il s'est trouvé des astronomes pour en faire des météores atmosphériques, des produits d'exhalaisons terrestres. Les hypothèses les plus bizarres furent mises en avant pour expliquer leur origine, leurs apparitions, leurs mouvements apparents, jusqu'à l'époque où le grand géomètre qui formula les lois de la gravitation eût



COMÈTES DE 1577, DE 1680 ET DE 1769

1 Comète de 1577, d'après Cornélius Gemma.— 2. Comète de 1680, d'après J. C. Sturm.
3. Comète de 1769, d'après Messier.

montré que les comètes y sont soumises comme les planètes. Décrivant, comme celles-ci, des orbites ayant le Soleil pour foyer commun, elles n'en diffèrent, au point de vue de leurs mouvements, que par les caractères dont nous allons maintenant faire l'énumération.

Comme tous les astres, les comètes participent au mouvement diurne, se levant, se couchant comme le Soleil, la Lune, les étoiles, les planètes : simple effet de la rotation de la Terre. Mais elles sont douées en outre d'un mouvement propre qui accuse leur marche réelle dans l'espace interplanétaire ; ce mouvement propre est souvent si rapide qu'on a vu des comètes décrire en un seul jour, parmi les constellations, des arcs de 40°, de 120° même en longitude. Elles parcourent d'ailleurs le ciel dans tous les sens, avec les vitesses les plus inégales ; sans se renfermer comme les planètes dans une zone plus ou moins étroite de part et d'autre de l'écliptique (le Zodiaque), elles se meuvent parmi les constellations les plus éloignées de ce plan. Quelquefois elles apparaissent brusquement, décrivent avec rapidité une trajectoire dans un sens ; puis elles se ralentissent et s'arrêtent, pour reprendre en rétrogradant une route opposée et disparaître, tantôt s'éloignant du Soleil, tantôt se noyant dans ses rayons. Ce sont ces mouvements singuliers, ces apparences bizarres, résultats de la combinaison des vitesses de la Terre et des comètes, de la proximité à laquelle elles se trouvent de notre globe en certains points de leur course, qui ont si longtemps dérouté les astronomes.

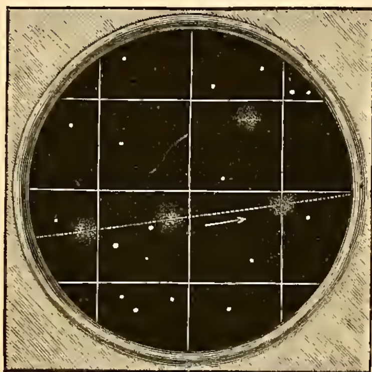


Fig. 195. Mouvement propre d'une nébulosité cométaire.

Disons en passant que le mouvement propre d'une nébulo-

sité aperçue, est l'indice qui permet de reconnaître une comète nouvelle ; on ne pourrait sans cela, le plus souvent, la distinguer des nombreuses nébuleuses télescopiques, mais en apparence immobiles, dont le ciel est parsemé[1].

Les orbites cométaires sont, comme celles des planètes, des sections coniques, ou courbes du second degré, abstraction

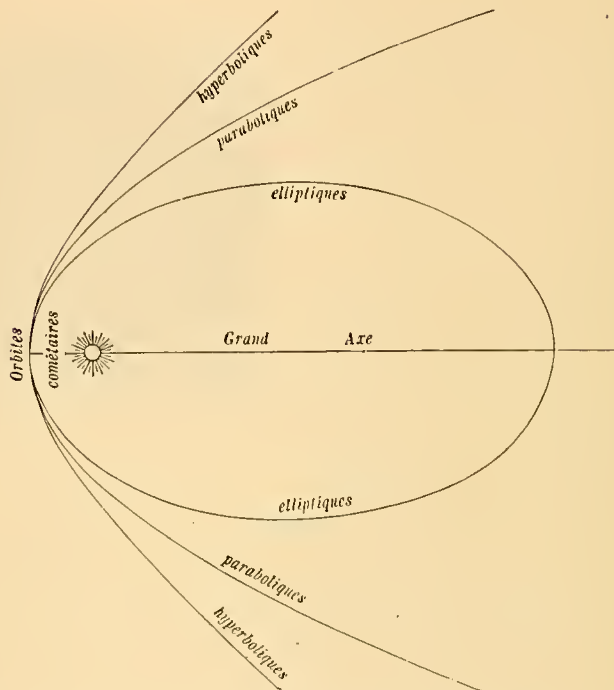


Fig. 196. Forme géométrique des orbites cométaires. Ellipse, parabole et hyperbole.

faite bien entendu des perturbations que les comètes peuvent éprouver de la part des planètes dans le voisinage desquelles elles voyagent. Pour la grande majorité, ce sont sans doute des *ellipses*, mais des ellipses si allongées, ayant une excentricité si considérable, qu'on ne peut les distinguer d'une

1. On voit que la méthode de recherche des comètes est analogue à celle qui a pour objet les petites planètes. Mais le champ est beaucoup plus vaste, car les comètes peuvent apparaître bien loin de la zone du zodiaque.

parabole[1] qui aurait le même foyer. La moins excentrique des orbites cométaires calculées est celle de la comète périodique de Faye, et la plus allongée des orbites planétaires est celle de la planète télescopique Libératrix (c'était il y a quatre ans la planète Polymnie). Or, l'excentricité de l'orbite de la comète est 0.5574, tandis que celle de la planète est 0.3467, à peine les $\frac{7}{11}$ de la première. La figure 196 rend sensible à l'œil cette différence d'excentricité. Parmi les comètes qui décrivent des ellipses, ou si l'on veut, dont on a pu calculer les éléments elliptiques, il en est qui s'éloignent, à leur aphélie, à des distances telles qu'elles se mesurent par des centaines, par des milliers de fois la distance du Soleil à la Terre. Nous en citerons plus loin des exemples.

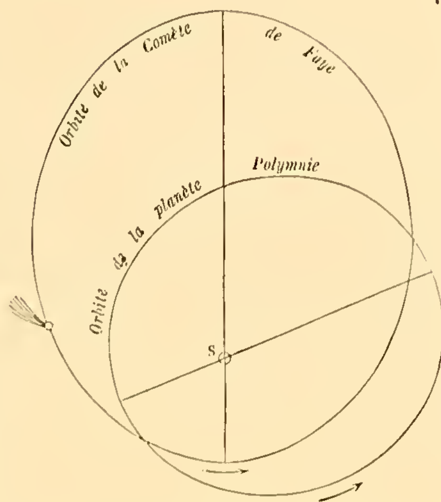


Fig. 197. Comparaison de l'orbite planétaire la plus allongée avec l'orbite cométaire la moins excentrique.

Est-il des comètes qui décrivent vraiment des orbites paraboliques? On ne sait. Tout ce qu'on peut dire, c'est que la portion d'arc, observée pendant la courte période de leur visibilité, ne peut pas se distinguer d'un arc de parabole. Cela est si général que les astronomes, dès qu'une comète a été observée au moins trois fois à de suffisants intervalles, com-

1. La parabole est, comme on sait, une courbe à branches infinies, qu'on obtient en coupant un cône circulaire par un plan parallèle à l'une des arêtes. C'est la limite des ellipses ayant même sommet et même foyer, et dont le grand axe croît jusqu'à l'infini. L'hyperbole est une courbe à double branche infinie, qui s'obtient par une section du cône, coupant les deux nappes opposées. L'ellipse enfin résulte d'une section coupant les arêtes d'une même nappe. (Voy. la figure 196.)

mencent toujours par calculer les éléments paraboliques de l'orbite; sauf à voir si des observations ultérieures nécessiteront, dans les éléments trouvés, de telles corrections, qu'une parabole ne puisse être la courbe décrite. Dans ce dernier cas, on cherche l'ellipse qui peut y satisfaire, ou quelquefois, mais plus rarement, on est obligé, pour représenter les observations, d'avoir recours à une orbite hyperbolique[1].

1. On a vu que, par une généralisation hardie, mais logique, Newton supposa les comètes soumises aux mêmes tendances que les planètes, entraînées à la fois par une force d'impulsion primitive et par la pesanteur ou gravitation, qui les porte vers le foyer de tous les mouvements de notre système, le Soleil. Essayons de montrer par des exemples simples de quelle nature doit être l'orbite d'un corps soumis à de telles influences.

Soit (fig. 198) une masse pesante, un astre M gravitant vers le Soleil et en

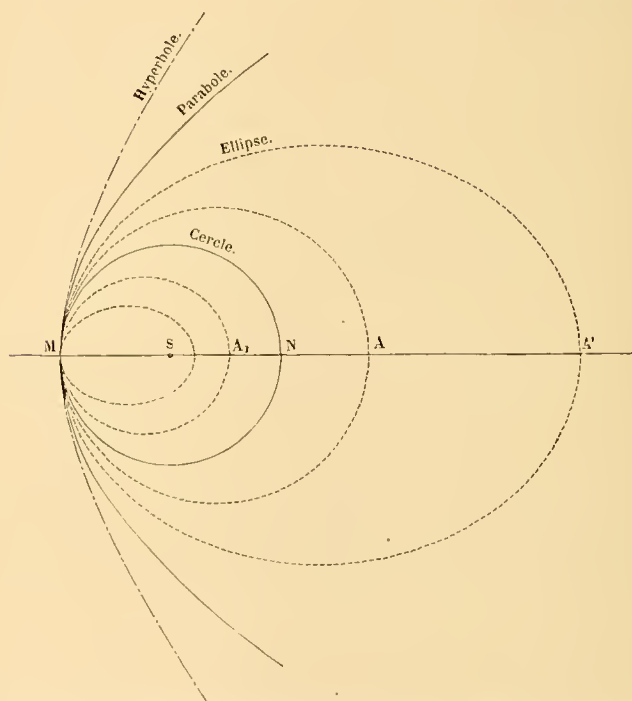


Fig. 198. Relation entre les vitesses et la forme des orbites. Vitesses planétaires ou elliptiques, cométaires ou paraboliques, hyperboliques.

même temps animé d'une certaine vitesse due à une impulsion étrangère à la gravitation. Supposons, pour plus de simplicité, que M soit au point où

Voilà donc un premier caractère important, la grande excentricité des orbites, qui distingue les comètes des planètes. Il en est un autre non moins grand : c'est l'inclinaison des plans des orbites. Tandis que, parmi les huit planètes principales, une seule, Mercure, a une inclinaison de 7°, que Pallas, parmi les 169 planètes télescopiques, atteint seule une inclinaison de 34°, les plans des orbites cométaires ont toutes

cette vitesse ait une direction perpendiculaire à celle du rayon vecteur qui joint l'astre au Soleil. La forme géométrique de l'orbite que l'astre décrira autour du Soleil, dans cette hypothèse, va uniquement dépendre du rapport existant entre la vitesse initiale en question et la distance. Pour une certaine valeur déterminée de ce rapport, la courbe décrite est un cercle dont le Soleil est le centre, et l'astre en parcourt indéfiniment avec une vitesse uniforme toute la circonférence. La vitesse qui, pour une distance donnée, est susceptible de faire décrire un cercle à une masse soumise en outre à la gravitation, est ce qu'on nomme la *vitesse circulaire*. Une vitesse moindre donnerait lieu à une orbite elliptique; en ce cas, le Soleil, au lieu d'occuper le centre de l'ellipse, serait à l'un des foyers, le plus éloigné de M, et le point M serait l'aphélie de l'astre en mouvement.

Pour une vitesse plus grande que la vitesse circulaire, au contraire, l'orbite sera bien encore une ellipse ayant le Soleil pour foyer; mais alors M sera le périhélie, et l'astre n'atteindra sa plus grande distance au foyer d'attraction qu'à l'extrémité opposée du diamètre MS. Plus la vitesse initiale sera grande, plus l'orbite sera allongée, plus l'ellipse aura une excentricité considérable. Mais si cette vitesse venait à égaler une certaine valeur, égale à la vitesse circulaire correspondant à la même distance, multipliée par le nombre 1.414 (ou par la racine carrée de 2), à ce moment l'ellipse dont le grand axe avait atteint des longueurs croissantes, qui s'était dès lors allongée progressivement et de la façon la plus rapide, se transforme en une courbe à branches infinies, à laquelle on donne le nom de *parabole*. Un astre qui se trouve animé de la vitesse correspondante ou de la *vitesse parabolique*, au moment où, atteignant sa plus courte distance au Soleil, il arrive au périhélie, est donc un astre qui vient de l'infini et qui s'en retourne à l'infini ; un tel astre, s'il en existe, avant d'arriver dans la région du ciel où l'action du Soleil devient prépondérante, n'appartenait donc point à notre systène. Après son passage au périhélie, il s'éloigne indéfiniment du Soleil, et, à moins de perturbations causées par des planètes, il devient de nouveau étranger au système.

Enfin, pour épuiser tous les cas possibles, il faut considérer encore celui où la vitesse de l'astre dépasse, au périhélie, la valeur de la vitesse parabolique; l'orbite décrite est toujours une courbe à branches infinies : mais c'est alors une *hyperbole* dont le Soleil occupe toujours un des foyers.

les inclinaisons possibles, entre 0° et 90°. Sur 242 comètes cataloguées, 59 ont une inclinaison comprise entre 0° et 30°, 93 en ont une entre 30° et 60°, 90 vont de 60° jusqu'à 90°.

Enfin le sens du mouvement différencie encore les comètes des planètes et en fait bien une famille à part dans le groupe constituant le monde solaire. Toutes les planètes, tous leurs satellites se meuvent dans le même sens autour du Soleil, et ce sens est celui de tous leurs mouvements de rotation. Parmi les comètes, outre qu'aucun mouvement régulier, constant, de rotation n'a été déterminé, le sens dans lequel elles parcourent leurs orbites est tantôt rétrograde, tantôt direct : sur 242 comètes, 119 ont un mouvement direct, 123 ont un mouvement rétrograde.

Sur un nombre total d'environ 800 comètes observées depuis les temps les plus anciens jusqu'à nos jours, 312 seulement ont fourni des observations assez précises pour que les astronomes aient pu calculer les éléments de leurs orbites. 57 apparitions se rapportent à des comètes identiques, c'est-à-dire à celles dont deux retours périodiques au moins ont eu lieu, et qui dès lors (sauf des perturbations ultérieures) appartiennent d'une façon permanente au système solaire. Défalcation faite de ces apparitions multiples, on trouve en tout 264 comètes distinctes dont les orbites se répartissent ainsi[1] :

Orbites paraboliques	177
Orbites elliptiques	73
Orbites hyperboliques	14.

Les 14 comètes à orbites hyperboliques sont évidemment des

1. Il ne faut pas cependant considérer cette statistique comme absolument certaine. Les anciennes observations étaient souvent douteuses ; les observations modernes, quoique bien plus exactes, ne sont pas toujours assez nombreuses pour permettre un calcul rigoureux des éléments. Les nombres que nous donnons d'après les catalogues suffisent néanmoins pour une classification approximative.

passagères dans notre système, et il en est peut-être ainsi de quelques autres parmi les 117 comètes à orbites paraboliques; mais aussi il est possible et probable, on l'a vu plus haut, que beaucoup de ces dernières décrivent des orbites elliptiques excessivement allongées. Enfin, sur les 73 comètes elliptiques, il en est 9 seulement, ne l'oublions pas, qui ont effectué sous nos yeux leur retour, et dont la périodicité a été, à la fois, reconnue par le calcul et confirmée par l'observation.

A la vérité, sont-ce là toutes les comètes, nous ne dirons pas du ciel, mais seulement des régions du ciel que nous étudions en ce moment, c'est-à-dire toutes les comètes du système solaire? Question tout entière du domaine des probabilités. Lambert, au siècle dernier, basant ses évaluations sur la répartition des périhélies des comètes alors calculées, dont l'une, la comète de 1680, avait son périhélie soixante fois plus près du Soleil que Mercure, et adoptant l'hypothèse qu'elles doivent être également distribuées dans les espaces interplanétaires, portait à plus de deux millions le nombre probable des comètes circulant à l'intérieur de l'orbe de Saturne. Mais l'illustre géomètre, s'appuyant sur des considérations de causes finales que personne n'admet plus aujourd'hui, pensait que le nombre de ces comètes devait croître seulement comme les carrés, non comme les cubes des distances. Arago, rectifiant cette vue en partant lui-même du nombre des comètes cataloguées en 1853, arrivait au total de dix-sept millions de comètes renfermées dans l'orbite de Neptune.

Le même calcul appliqué aux nombres d'aujourd'hui en donnerait plus de vingt millions. Mais nous avons fait observer, dans notre ouvrage des Comètes, en traitant cette question avec tous ses développements, qu'il n'y avait évidemment aucune raison pour limiter à l'orbite de Neptune l'espace où se meuvent les comètes qui sont soumises à l'action du Soleil. Or, en reculant cette limite à la moitié de la distance qui sépare notre système des systèmes stellaires les plus voisins,

c'est-à-dire des étoiles de première grandeur, on trouve un nombre 37 milliards de fois aussi grand. Ainsi, il y aurait au moins *soixante-quatorze millions de milliards de comètes* soumises chacune, pour une au moins de leurs périodes, à l'empire de l'attraction solaire. En présence de telles considérations, ajoutions-nous, la comparaison de Képler n'est plus seulement une métaphore, et il est permis de dire littéralement, avec le grand astronome du seizième siècle : « Les comètes sont aussi nombreuses dans le ciel que les poissons dans l'Océan, *ut pisces in Oceano.* »

§ 2. LES COMÈTES PÉRIODIQUES.

Parmi les comètes dont les orbites ont été calculées, il en est un certain nombre qui décrivent des ellipses autour du Soleil. Les grands axes de ces courbes étant connus, la troisième loi de Képler permet de calculer la durée de chacune des révolutions, et par conséquent de prédire l'époque du plus prochain retour de ces comètes à leur périhélie[1]. Néanmoins, même dans le cas d'une orbite cométaire elliptique, la prédiction n'est jamais bien certaine, si l'astre n'a été vu

1. Malgré les protestations souvent renouvelées des astronomes, on entend encore formuler contre les savants un singulier reproche. Qu'une comète visible à l'œil nu et remarquable par son éclat et les dimensions de sa queue, vienne à rendre visite aux régions du ciel où se trouve la Terre, et l'on est assuré d'entendre nombre de gens s'étonner que l'apparition de l'astre n'ait point été prophétisée. On va comprendre pourquoi les savants ne peuvent, en général, annoncer l'approche d'une comète encore invisible, comme ils annoncent la position d'une planète ou les phénomènes des éclipses.

Toutes les comètes, nous l'avons vu, ont le Soleil pour foyer de leur mouvement. Toutes, en venant visiter notre monde, décrivent une courbe autour de l'astre radieux, courbe dont la concavité est toujours tournée vers le Soleil. Mais on vient aussi de voir que la plupart des orbites cométaires sont si allongées, qu'elles semblent être des paraboles dont les branches s'éloignent à l'infini; d'autres seraient même des branches d'hyperbole. Qu'en



COMÈTE DE HALLEY

D'après sir J. Herschel. — 1. La Comète vue à l'œil nu, dans Ophiucus, le 24 octobre 1835. — 2. Vue dans une lunette de sept pieds de foyer. — 3, 4, 5, 6. Détails de la tête de la Comète, de la fin d'octobre 1835 au commencement de février 1836.

qu'à l'un de ses passages; l'arc de courbe observé n'étant jamais qu'une faible partie de l'orbite totale, ne peut donner la courbe entière ou ses éléments que d'une façon très-approchée. Le plus sûr, c'est de pouvoir identifier l'orbite de la comète observée avec celle d'une comète antérieurement cataloguée : l'intervalle écoulé est considéré alors comme égal, soit à la période même, soit à l'un de ses multiples. C'est ainsi qu'a été reconnue la périodicité de plusieurs des comètes, en petit nombre, il est vrai, qui appartiennent d'une façon permanente à notre système.

Ainsi, au point de vue qui nous occupe, toutes les comètes peuvent être rangées en deux catégories principales : celles dont les orbites sont paraboliques ou hyperboliques, c'est-à-dire dont la périodicité est inconnue ou même n'existe point; et les comètes périodiques, qui décrivent des ellipses autour du Soleil. Celles-ci, à leur tour, se subdivisent en deux classes selon que la périodicité calculée a été ou non vérifiée par un retour postérieur à la découverte de l'astre.

Neuf comètes seulement, parmi les 73 comètes à orbites elliptiques, appartiennent à la classe de celles dont le retour a été constaté par l'observation. Ce sont celles que nous allons

faut-il conclure pour les comètes qui décrivent dans l'espace de semblables trajectoires? Ou elles ne reviendront jamais, l'immense distance à laquelle elles s'éloignent du Soleil les entraînant peut-être dans la sphère d'attraction de quelque autre monde; ou bien, si elles doivent revenir, ce ne sera sans doute qu'au bout d'un intervalle de temps considérable, après des milliers de siècles. Ainsi, la plupart des comètes, quand elles sont observées, visitent pour la première fois les régions célestes occupées par notre monde; ou bien, si elles sont venues déjà, c'est à des époques tellement éloignées de la nôtre qu'aucune observation humaine n'a pu être transmise jusqu'à nous, si tant est qu'à cette époque l'homme existât déjà sur la Terre. Dans ces deux hypothèses, comprend-on l'impossibilité manifeste d'une prédiction scientifique? Les éléments de cette prédiction manquent encore après une et même deux observations : où les eût-on pris avant la venue de l'astre? Les comètes antérieurement observées, et à orbites elliptiques, sont donc les seules dont le retour puisse être calculé à l'avance.

étudier les premières et dont voici d'ailleurs la liste, à laquelle nous joignons leurs principaux éléments.

Noms des comètes.	Durées des révolutions. Ans.	Grands axes des orbites.	Distances périhélies.	Distances aphélies.	Époques des derniers retours.
Encke	3.285	2.2097	0.3329	4.0865	13 avril 1875
Brorsen	5.483	3.1096	0.5968	5.6225	10 oct. 1873
Winnecke . . .	5.591	3.1499	0.7815	5.5183	12 mars 1875
Tempel	5.963	3.2914	1.2872	5.2956	9 mai 1873
D'Arrest	6.567	3.5067	1.2803	5.7331	22 sept. 1870
Biéla boréale. .	6.587	3.5137	0.8602	6.1673	2 déc. 1872
Biéla australe.	6.629	3.5887	0.8606	6.1969	
Faye.	7.413	3.8018	1.6822	5.9215	18 juillet 1873
Tuttle.	13.811	5.7565	1.0301	10.4829	30 nov. 1871
Halley.	76.370	18.0001	0.5889	35.4112	15 nov. 1875

La première des comètes, dont la périodicité a été bien constatée, tant par l'observation que par les calculs, porte le nom de Halley, astronome anglais du dix-septième siècle. C'est à ce savant qu'on doit, en effet, l'identification de la comète de 1682 avec celles de 1531 et de 1607, et la prédiction du retour de l'astre pour la fin de 1758 ou le commencement de 1759[1]. L'événement justifia la prédiction. Bien plus, à cette dernière époque, l'astronomie cométaire s'éleva, par un coup d'essai qui fut son triomphe, à la hauteur des autres théories astronomiques. Un géomètre français, Clairaut, calcula quel devait être, sur la marche de la comète annoncée, l'effet des perturbations dues aux deux grandes planètes Jupiter et Saturne, dans le voisinage desquelles l'astre chevelu devait passer. Il assigna 618 jours de retard, 100 jours dus à l'action

1. Halley avait remarqué la presque identité des éléments des orbites des deux comètes qui avaient paru, à 75 ans d'intervalle, en 1607 et 1682. En remontant 76 ans plus haut, il trouva que l'orbite de la comète de 1531, malgré des différences imputables à l'inexactitude des observations, offrait également beaucoup de ressemblance avec l'orbite de la comète de 1682. Enfin, à des intervalles à peu près égaux, il trouvait les apparitions des comètes de 1305, 1380 et 1456. Halley avait déjà exprimé l'opinion que la différence entre les deux plus récentes périodes était due à l'action de Jupiter.

de Saturne, 518 à celle de Jupiter. Le retour de l'astre à son périhélie devait ainsi correspondre au milieu d'avril 1759, avec une incertitude d'un mois en plus ou en moins, incertitude provenant de termes que Clairaut, pressé par le temps, avait dû négliger dans son calcul[1].

Depuis, en 1835, la comète de Halley a paru dans nos régions; mais cette fois son passage fut prédit avec une précision telle, qu'il y eut entre le calcul et l'observation moins de trois jours de différence[2].

L'orbite de la comète de Halley est une ellipse si allongée qu'elle dépasse, à son point le plus éloigné du Soleil, l'orbite même de Neptune. Aussi faut-il en moyenne plus de 76 ans — 27866 jours — à la comète de Halley pour parcourir cette courbe immense. Ce qui distingue surtout un tel astre des planètes du système, c'est que la forme excentrique de son orbite, tantôt la rapproche du Soleil à une distance moindre que celle de Vénus, et qui ne dépasse pas vingt-deux millions 500 mille lieues, et tantôt l'éloigne du foyer de chaleur et de lumière à une distance plus de 60 fois aussi grande, qui atteint à peu près un milliard 300 millions de lieues. Ces variations énormes dans les distances forcent à admettre, dans l'intensité de la chaleur et de la lumière que la comète reçoit du Soleil, les plus étonnantes différences. Et, en effet, cette intensité varie dans la proportion de 3600 à l'unité, ou si l'on préfère, la lumière et la chaleur du Soleil arrivent à la co-

1. Arago, *Astronomie populaire*, II, p. 280.

2. Et même seulement $0^j.66$ d'après le calcul des perturbations de M. de Pontécoulant. Ce savant a déterminé de la même manière la date du prochain retour de la comète de Halley : elle passera au périhélie le 16 mai 1910, vers 11 heures du soir.

Parmi les apparitions anciennes qui paraissent certaines, de la comète de Halley, antérieures à celles que nous avons déjà rapportées, on cite celle de l'an 12 av. J. C. et celles des années de notre ère, 66, 141, 451, 684, 760, 989, 1066, 1152, 1301, 1378 et 1456. Hind a signalé huit autres apparitions plus douteuses.

mète avec une force 3600 fois plus considérable au périhélie qu'à l'aphélie. La comète de Halley se meut d'Orient en Occident, dans un plan incliné sur l'orbite de la Terre de la cinquième partie d'un angle droit (17° 45′). C'est, parmi les 9 comètes périodiques que nous étudions, la seule dont le sens du mouvement soit rétrograde. On peut voir dans la planche XXVII les divers aspects sous lesquels elle s'est montrée en 1835,

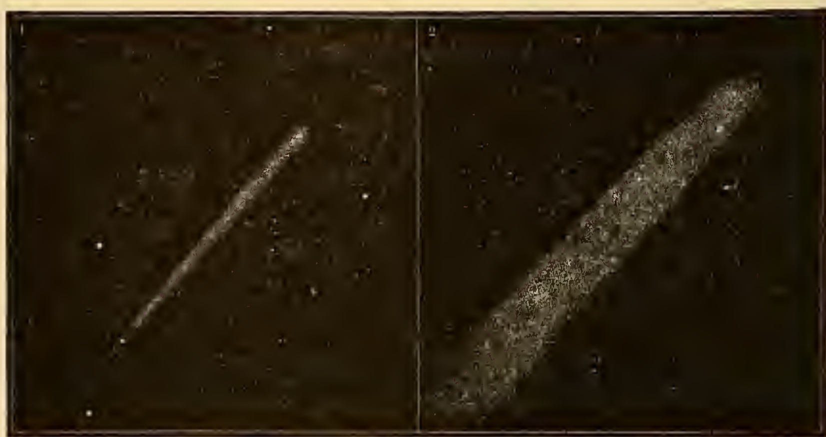


Fig. 199. La comète de Halley à son passage en 1835.
1. Vue à l'œil nu, le 24 octobre 1835. — 2. Aspect de la comète vue au télescope.

à l'œil nu et au télescope, soit dans son ensemble, soit dans les parties de la nébulosité qui en formaient la tête.

En suivant l'ordre des découvertes, c'est la comète d'Encke que nous avons maintenant à décrire.

Invisible à l'œil nu, elle se présente dans les télescopes sous la forme d'une masse vaporeuse, à peu près sphérique, dépourvue à la fois de queue et de noyau lumineux. Circonstance singulière, la nébulosité de la comète d'Encke varie en même temps de forme et de dimensions, et c'est précisément à l'époque de ses plus courtes distances au Soleil qu'on l'a vue sous un plus faible volume.

De toutes les comètes dont le retour périodique a été constaté[1], c'est celle qui accomplit sa révolution autour du Soleil dans le plus court intervalle de temps. Cette durée est en moyenne de 1205 jours, un peu moins de trois ans un tiers. Elle se meut d'Occident en Orient dans une courbe telle, que sa distance à l'astre central varie entre 13 millions et 156 millions de lieues.


Fig. 200. La comète d'Encke, le 13 août 1868.

Ainsi, voilà un astre qui, à chacune de ses révolutions, pénètre jusqu'à l'intérieur de l'orbite de Mercure, pour dépasser, tout près de celle de Jupiter, la région des petites planètes. Depuis 1818, époque de sa découverte, tous ses retours, au nombre de dix-sept, ont été régulièrement constatés; mais, circonstance remarquable, la durée de sa révolution va en diminuant sans cesse, de sorte que, si cette diminution progressive suit toujours le même ordre, on pourra calculer l'époque, encore bien éloignée du reste, où la comète ira, en décrivant une spirale, se plonger dans la masse incandescente ou dans l'atmosphère du Soleil. Ce rapprochement continu a été attribué à la résistance d'un milieu qui remplirait les régions de l'espace, voisines du foyer de notre monde[2].

1. Découverte en 1818 par Pons à Marseille, cette comète a été reconnue, par Arago et Olbers, comme identique à la comète de 1805. Le dernier de ces savants indiqua en outre les comètes de 1786 et de 1795, comme des apparitions probables du même astre. C'est à Encke que revient l'honneur d'avoir calculé les éléments elliptiques. Son passage au périhélie a été observé 21 fois depuis 1786; le prochain aura lieu vers le 25 juillet 1878.

2. Cette question a été reprise récemment par le Dr V. Asten. Ce savant croit que l'accélération de la comète d'Encke ne peut pas s'expliquer par l'hypothèse d'un milieu résistant. D'après lui, les observations de la comète,

La comète d'Encke fut d'abord spécialement désignée par l'appellation de *comète à courte période*.

Parmi les sept autres comètes, dont le calcul et l'observation ont à la fois confirmé la périodicité, et qui portent les noms de Gambart ou de Biéla, de Faye, de Tempel et de Brorsen, de Winnecke, de d'Arrest et de Tuttle, il n'y a guère que la première qui mérite une mention spéciale. Les autres, toutes télescopiques, n'ont offert jusqu'ici, sous le rapport de leur aspect physique, aucun intérêt particulier[1].



Fig. 201. Comète de Borsen, le 14 mai 1868, d'après un dessin de Bruhns.

Il n'en est pas de même de la comète de Gambart ou de Biéla. Découverte en 1826, elle effectua sa première réapparition dans l'automne de 1832, et causa une vive émotion par l'annonce, un peu prématurée, qu'elle devait à son passage venir rencontrer et heurter la Terre. Des calculs plus précis démontrèrent, bien avant l'événement, que la comète arriverait

de 1865 à 1871, sont parfaitement d'accord avec les lois de la gravitation, sans aucun effet appréciable provenant de la résistance d'un milieu. Les perturbations planétaires ordinaires suffisent à en rendre compte. La comète, il est vrai, vers son passage au périhélie, éprouve des changements dans son orbite, mais qui s'expliqueraient plutôt, comme Bessel l'admettait, par l'action de courants étrangers ou d'essaims météoriques.

1. Disons toutefois que la comète de Faye, dont les éléments elliptiques ont été calculés par notre savant compatriote en 1843, peu après la découverte qu'il en avait faite lui-même à l'observatoire de Paris, a fait sa quatrième réapparition en 1873. Elle a été revue en 1865, à Paris et à Copenhague, sous la forme d'un noyau lumineux entouré d'un halo circulaire. La durée de sa période paraît subir, comme celle d'Encke, une diminution sensible. La comète de Borsen, dont nous reproduisons ici un dessin, offre cette particularité d'avoir plusieurs noyaux brillants dans la partie la plus condensée de la nébulosité.

au point commun des orbites des deux astres un mois avant notre globe, et qu'ainsi toute rencontre était évidemment impossible. Mais l'alarme était donnée. Les imaginations s'exal-

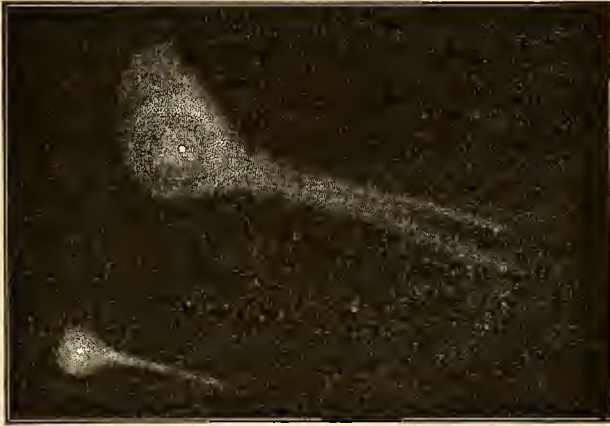


Fig. 202. Comète de Gambart ou de Biéla dédoublée, le 19 février 1846, d'après Struve.

tèrent et l'idée de la fin du monde — de notre monde terrestre bien entendu — envahit nombre de cervelles. Croirait-on que



Fig. 203. Comète de Biéla, le 21 février 1846, d'après Struve.

parmi les personnes même qui eurent confiance dans la précision des calculs astronomiques, il s'en trouva qui craignirent tout au moins un dérangement pour l'orbite de notre planète?

Sans doute, pour elles, une orbite était quelque chose de matériel, un cercle métallique par exemple, un rail céleste. « Comme si, dit Arago en rapportant cette plaisante conception, la forme de la route parabolique qu'une bombe va parcourir dans l'espace en sortant du mortier, pouvait dépendre du nombre et de la position des courbes que d'autres bombes auraient anciennement décrites dans les mêmes régions[1] ! »

Plus loin nous dirons quelques mots de cette question qui peut un jour intéresser vivement les habitants du globe terrestre, à savoir du danger et de la probabilité de la rencontre d'une comète et de la Terre.



Fig. 204. Les deux comètes jumelles de Biéla, à leur retour en 1852, d'après Secchi.

Si la comète de Gambart ne réalisa point les craintes qu'on avait conçues, elle subit elle-même plus tard une étrange transformation : elle se dédoubla. Dès 1846, elle apparut sous la forme de deux comètes, d'inégales grandeurs, qui s'éloignèrent de plus en plus. En 1852, les deux comètes reparurent

1. Peut-être aussi ces personnes entendaient-elles par là que la masse de la comète était capable, par le rapprochement des deux astres, de troubler la marche de la Terre, et, par suite, de modifier les éléments de son orbite, hypothèse qui n'a pu se vérifier, la masse cométaire étant beaucoup trop faible, mais qui n'a rien que de très-rationnel.

voyageant de concert, mais la distance des deux noyaux, qui était déjà de 60 000 lieues en 1846, s'élevait alors à un demi-million de lieues. Ce qui est plus étrange encore, c'est qu'elle n'a pas été revue à son retour de 1865, lequel devait avoir lieu à la fin de l'année : la matière dont elle se compose serait-elle entièrement dispersée sous forme d'essaim de météores, ainsi que le donne à penser l'identité présumée de son orbite et des étoiles filantes de décembre[1] ? Les annales de l'astronomie avaient enregistré déjà de semblables transformations ; mais comme il s'agissait de comètes qui n'ont point reparu, les savants hésitaient à croire à la réalité d'un fait sur lequel il ne peut y avoir désormais aucun doute.

§ 3. COMÈTES PÉRIODIQUES NON REVUES.

Le nombre est restreint, comme on voit, des comètes dont la périodicité a été confirmée par un ou plusieurs retours observés. Sauf la comète de Halley, toutes sont des comètes à courtes périodes. Quelques autres auraient pu, auraient dû être rangées dans la même catégorie ; mais depuis leur première apparition, on n'a pu réussir à les revoir, soit parce que les circonstances de leur retour n'ont pas été favorables à l'observation, soit parce que, dans le cours de leurs dernières révolutions, elles ont subi des perturbations assez fortes pour changer complétement leurs orbites. C'est ce qu'on peut appeler les comètes égarées ou perdues. Citons-en quelques-unes.

En février 1743, on vit en Europe une comète dont les éléments paraboliques furent calculés alors par Struyck et La-

1. M. Pogson croit avoir revu la comète, à Madras, le 2 décembre 1872, mais cette identité ne paraît pas absolument certaine. On pense que c'est la comète de Biéla, ou du moins l'un de ses fragments, qui a donné lieu à l'averse d'étoiles filantes du 27 novembre 1872.

caille. Un géomètre contemporain, M. Clausen, a reconnu l'ellipticité de son orbite, et calculé une période de 5 ans 5 mois. Est-ce la même qu'on a revue en novembre 1819? C'est ce qu'on a supposé. Mais Encke n'assignant à celle-ci qu'une révolution de 4 ans et 10 mois, il faudrait admettre que, dans l'intervalle de 76 ans qui sépare les deux apparitions, l'orbite primitive a été notablement altérée. En tout cas, elle n'a pas été revue depuis.

Parmi les comètes perdues, il en est une qui est célèbre dans l'histoire de l'astronomie : c'est celle de 1770 ou de Lexell, du nom de l'astronome qui a reconnu l'ellipticité de son orbite et fixé à 5 ans 6 dixièmes la durée de sa révolution périodique; observée de juin à octobre 1770, elle n'a pas été revue. Sa courte période fit qu'on s'étonna de ne l'avoir pas observée avant 1770, et qu'on mit en doute les résultats de Lexell. Mais ce savant prouva qu'elle avait dû, en 1767, passer à une faible distance de Jupiter, et que l'influence de la masse de cette planète dut être assez considérable pour modifier le mouvement de la comète, et de parabolique le rendre elliptique. Laplace fit voir qu'une action inverse, exercée par le même Jupiter, devait en augmenter la distance périhélie et rendre désormais la comète invisible, comme elle le fut en effet. Le même problème a été repris à nouveau de nos jours par M. Le Verrier, qui a tenu compte à la fois de l'influence de la Terre, dont la comète en 1770 s'approcha de sept fois à peine la distance de la Lune, et de l'influence de Jupiter neuf années après. Chose curieuse, il résulte de ces nouvelles recherches que l'ellipse cométaire fut alors rapidement changée en hyperbole, de sorte que si des actions opposées ne sont venues depuis troubler encore cette marche si accidentée, la comète de Lexell se trouve décidément enlevée au système solaire.

On a cru revoir la comète de Lexell dans la comète découverte à Rome, en août 1844, par Vico, et dont la période est d'environ 5 ans 1/2. M. Le Verrier a prouvé qu'il n'y avait

pas identité entre ces deux astres, mais que probablement la comète de Vico avait été observée déjà en 1678. On ne l'a pas revue, et dans quelques siècles elle sera peut-être rendue par Jupiter aux espaces d'où il l'avait une première fois tirée.

Citons encore la comète de 1766, dont la révolution est de 5 années, et qui est peut-être une apparition antérieure de celle découverte par Pons, en juin 1819. C'est aussi une comète perdue. Une comète découverte par Peters en juin 1846 et dont la période est de 16 ans, aurait dû être revue en 1862; elle le sera peut-être en 1878. La même année, on devra rechercher aussi la comète de 1873, découverte par Stephan, et dont la période est de 1850 jours, un peu plus de cinq années.

Il y a encore quatre autres comètes périodiques qu'on peut ranger parmi les précédentes, bien que leurs périodes s'allongent notablement; ce sont encore en effet des comètes intérieures, c'est-à-dire dont l'aphélie ne dépasse pas l'orbite de Neptune. La première est la comète de Tempel (1866 I) dont la révolution est de 33 ans et 64 jours. Son retour prochain est attendu pour le printemps de 1899. On regarde les comètes de 868 et de 1366 comme des apparitions antérieures de cet astre, qui, depuis la première de ces dates, serait revenu 29 fois au périhélie sans être aperçu qu'une fois. Il y a une seconde comète de 33 ans et demi : c'est celle de 1867 I, qui, comme la comète de Tempel, dépasse à son aphélie l'orbite d'Uranus; on devra la rechercher vers 1900. Deux autres comètes découvertes, l'une en 1846, par Vico, l'autre en 1873, par M. Coggia, ont des périodes d'environ 55 ans, et leurs mouvements s'accomplissent aussi à l'intérieur de l'orbite de Neptune.

Des comètes périodiques intérieures, nous arrivons à celles qui, comme la comète de Halley, vont dépasser à leurs aphélies les limites connues du monde solaire; mais, cette dernière comète exceptée, aucune n'a pu être revue encore : pour

quelques-unes seulement, on soupçonne leur identité avec des comètes apparues antérieurement. La confirmation de leur périodicité effective ne sera possible, pour les contemporains, que relativement à un très-petit nombre d'entre elles, vu les énormes durées de leurs périodes qui se comptent par siècles et même par centaines et par milliers de siècles.

Voici d'abord les révolutions et les distances périhélies et aphélies des neuf comètes à périodes moyennes ou inférieures à deux siècles. Deux seulement, les comètes de 1812 et de 1815, pourront être revues avant le vingtième siècle; la première vers 1882, la seconde vers 1887, le retour au périhélie devant être avancé de deux années par l'effet de certaines perturbations. Celle de 1853 ne reviendra au périhélie qu'au vingt et unième siècle, après s'être éloignée, à son aphélie, à une distance du Soleil qui dépasse de près de 200 millions de lieues le double de la distance de Neptune.

		Révolutions.	Distances périhélies.	Distances aphélies.
Comète de	1852 II	69 ans	0.65 = 24 000 000	31.99 = 1 180 000 000
—	1812	71	0.78 = 28 500 000	33.4 = 1 231 500 000
—	1846 III	73	0.66 = 24 337 000	34.4 = 1 268 500 000
—	1815	74	1.21 = 44 500 000	34.1 = 1 257 500 000
—	1847 V	75	0.49 = 18 750 000	35.1 = 1 294 500 000
—	1862 III	120	1.01 = 37 250 000	48.7 = 1 795 750 000
—	1532	129	0.61 = 22 500 000	48.05 = 1 771 800 000
—	1853 I	188	1.03 = 37 980 000	65.02 = 2 397 500 000
—	1683	190	0.55 = 20 280 000	65.5 = 2 415 500 000

Enfin, nous terminerons cette mention rapide des comètes périodiques dont les éléments ont été calculés, mais qu'on n'a pas revues, par le tableau des périodes de celles dont la révolution dépasse deux siècles. Quelques-unes sont célèbres dans l'histoire : citons la comète de 1264 qui se montra en Europe pendant près de 3 mois et disparut, dit-on, le jour même de la mort du pape Urbain VIII, coïncidence qui, dans ces époques de superstition religieuse, était bien propre à frapper les esprits;

c'est la même comète qui revint en 1556, et qu'on connaît sous le nom de comète de Charles-Quint[1]. Dès le siècle dernier, on prédisait sa réapparition pour 1848; mais elle ne fut point revue ni cette année ni les suivantes. Un travail d'un astronome de Midlebourg, M. Bomme, indiquant un retard de dix années causé par les perturbations planétaires, la fit rechercher, mais en vain, jusqu'en 1860. Elle n'a pas reparu, et si elle a passé réellement à son périhélie, c'est dans des circonstances défavorables à l'observation.



Fig. 205. Comète de 1264. D'après le *Theatrum cometicum* de Lubienietzki.

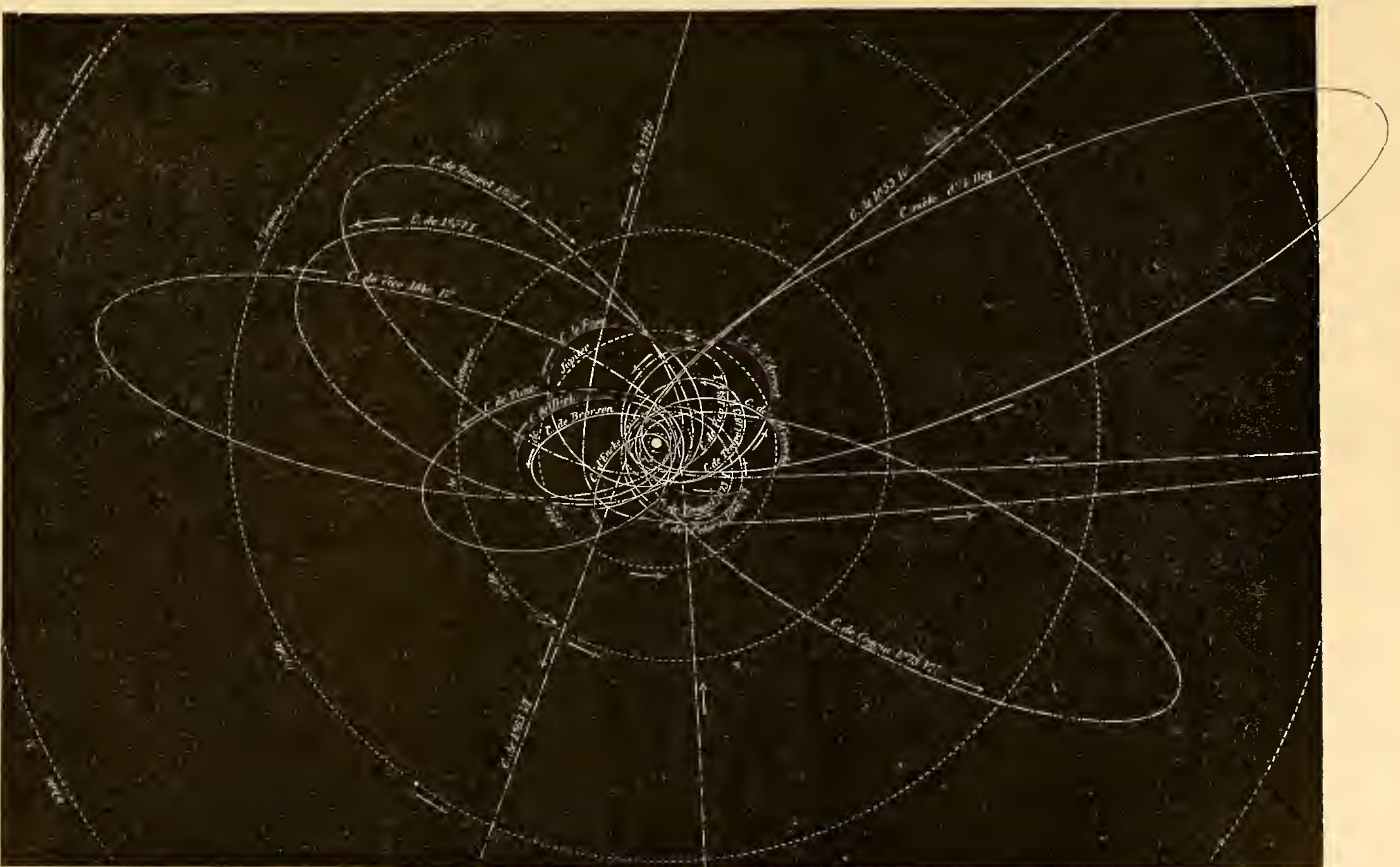
Il y a aussi, dans les trente comètes du tableau, la fameuse comète de 1680, que les calculs de Newton et les rêveries théologiques de Whiston ont rendue célèbre; puis la grande comète de 1843. De toutes les comètes connues ce sont celles qui, au périhélie, ont passé le plus près du Soleil : les noyaux des deux astres ont dû passer, l'un à 230000, l'autre à 125000 kilomètres seulement de la surface de la photosphère; ils ont traversé certainement les couches d'atmosphère hydrogénée qui constituent la couronne. Une autre comète fameuse est celle de 1811, qui a été observée aussi en 1812 et qui a fait sensation dans toute l'Europe, dans l'Occi-

1. C'était encore, il y a quelques années, une tradition que Charles-Quint avait été déterminé dans son abdication par l'apparition de l'astre chevelu. Mais M. Mignet a établi que l'abdication du fameux monarque avait eu lieu en 1555, et qu'ainsi la comète ne pouvait avoir été pour rien dans cette résolution.

dent parce qu'on lui a attribué l'excellence du vin connu sous le nom de *vin de la comète*, dans l'Orient parce que les Russes l'ont regardée comme le présage de la grande et fatale guerre du premier Napoléon contre la Russie.

	Apparitions antérieures probables.	Durée des périodes en années.	Distances au Soleil en rayons de l'orbite terrestre. Distances périhél^s.	Distances aphél^s.
Comète de 1845 III	1596	249	0.401	78.38
— 1556	1264	292	0.500	87.53
— 1840 IV	—	344	1.481	96.73
— 1843 I	—	376	0.005	104.28
— 1846 VI	—	401	0.633	108.21
— 1861 I	—	415	0.921	110.40
— 1861 II	—	422	0.822	111.70
— 1793 II	—	422	1.495	111.03
— 1746	1231	515	0.950	127.55
— 1840 III	1097	743	0.742	163.20
— 1811 II	—	875	1.582	181.44
— 1860 III	—	1000	0.292	211.30
— 1807	—	1714	0.646	286.07
— 1858 III	—	1950	0.578	311.40
— 1769	—	2090	0.123	326.80
— 1827 III	—	2611	0.138	379.10
— 1846 I	—	2721	1.481	388.32
— 1811 I	—	3065	1.035	421.02
— 1763	—	3196	0.498	434.32
— 1825 III	—	4386	1.241	534.64
— 1864 II	—	4738	0.909	563.30
— 1822 III	—	5649	1.145	618.15
— 1849 III	—	8375	0.895	812.73
— 1680	—	8813	0.006	855.28
— 1840 II	—	13 866	1.221	1053.00
— 1847 IV	—	43 954	1.767	2489.03
— 1780 I	—	75 838	0.096	3974.88
— 1844 II	—	102 050	0.855	4366.74
— 1863 I	—	2 840 000	0.795	29 989.00
— 1864 II	—	2 800 000	0.931	40 485.00

Les comètes à longue période n'ont rien qui les distingue des autres, si ce n'est les énormes distances où toutes s'éloi-



ORBITES DES COMÈTES PÉRIODIQUES

DU SYSTÈME SOLAIRE

Traits pleins,	————	Les neuf comètes dont le retour a été constaté par l'observation
Traits ponctués,	.—.—.—.	Comètes périodiques intérieures non encore revues.
—	—..—..—	Comètes à orbites hyperboliques (non périodiques).
—	------------	Orbites des planètes.

gnent du Soleil à leur aphélie. L'orbite la plus courte dépasse déjà les limites connues du système planétaire, de 48 fois la moyenne distance du Soleil à la Terre; la comète de 1845 s'éloigne en effet jusqu'à deux fois et demie la distance de Neptune, en un mot jusqu'à deux milliards cinq cent vingt millions de lieues. La comète de 102 000 ans s'enfonce à une distance 55 fois plus considérable encore. Enfin, les deux dernières, celles de 1863 I et de 1864 II, qui effec-

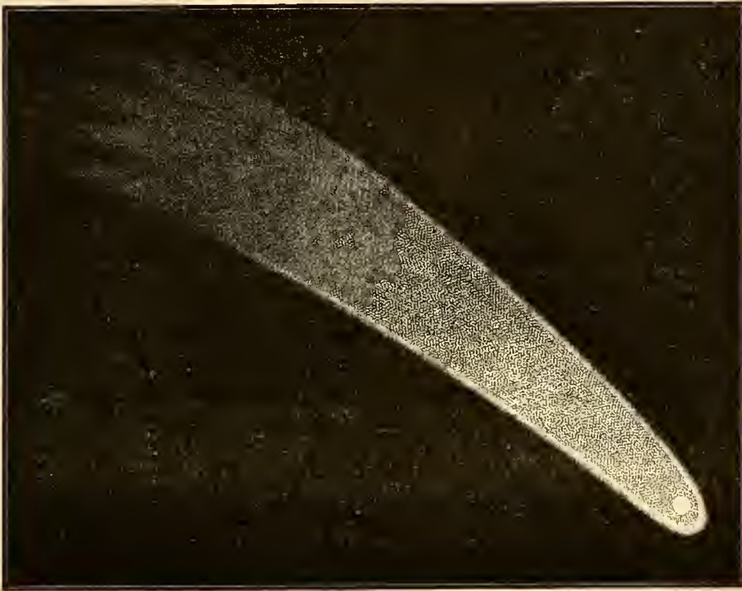


Fig. 206. Grande comète de 1811.

tuent leurs révolutions, la première en 1840 siècles, la seconde en 2800 siècles, pénètrent à leur aphélie dans des régions de l'espace si lointaines, qu'il faudrait alors à la lumière pour venir de ces comètes jusqu'à la Terre, 171 jours pour l'une et 230 jours pour l'autre. La comète de 1864 franchit, loin du Soleil, le cinquième environ de la distance de l'étoile Alpha du Centaure à notre système, puisque la distance de cette étoile au Soleil est égale à 200 000 fois au moins la moyenne distance du Soleil à la Terre : c'est, il est vrai, un voyage qui

dure un million quatre cent mille années pour l'*aller*, un million quatre cent mille années pour le *retour*. Quelque énormes que soient ces distances, il n'est pas juste de dire, comme on l'a fait en parlant de la comète de 1844 ou de 102 000 ans, que de telles comètes aillent se plonger dans l'espace à une distance plus grande que les distances de la Lyre, de la Chèvre, de Sirius. Cela est loin d'être vrai, même pour les comètes dont la période se mesure par des millions d'années; mais rien n'empêche qu'il en soit ainsi, pour des comètes à orbites paraboliques ou hyperboliques.

En comparant les comètes aux planètes, sous le rapport de leurs mouvements, on voit par tout ce qui précède, que ces deux groupes d'astres ont, avec un point commun ou de ressemblance, de profondes différences. Le point commun, c'est que les orbites cométaires sont régies par les mêmes lois que les orbites planétaires, et cela n'a rien que de très-naturel, puisque le principe commun est la gravitation. Les différences, nous venons de les passer en revue; ce sont l'excentricité presque toujours considérable des orbites, l'inclinaison de leurs plans qui prend toutes les valeurs de 0° à 90°, le sens tantôt direct et tantôt rétrograde des mouvements propres, enfin, pour un grand nombre de comètes, l'immensité de durée de leurs révolutions. Tandis que les éléments des orbites planétaires, contenus dans des limites resserrées, indiquent avec évidence une communauté d'origine avec le Soleil lui-même, la dissemblance, la divergence de ceux des comètes laissent assez présumer que ce sont des astres étrangers au système, traversant accidentellement notre monde, et que, si quelques-uns y ont été retenus, une telle introduction n'est due qu'à l'action perturbatrice des masses de quelques planètes, lesquelles pourront un jour les expulser par une action opposée.

Mais si les comètes sont étrangères, à l'origine, au système

solaire, sont-elles de même étrangères les unes aux autres? N'y en a-t-il pas parmi elles qui forment des groupes? En un mot, n'y a-t-il pas aussi des systèmes de comètes? Nous posons bien entendu cette question pour les seules comètes non périodiques, pour celles qui décrivent des paraboles ou des hyperboles. Sont-ce de simples voyageuses indépendantes, courant de systèmes solaires en systèmes solaires, sans jamais fixer nulle part leur course vagabonde? N'est-il point, parmi ces déclassées, des comètes groupées ensemble et parcourant leurs longues orbites de conserve?

La question ainsi posée paraît susceptible d'une solution directe, comme le témoignent les recherches faites dans ce sens par un astronome hollandais contemporain, M. Hœk. Ce savant, en étudiant et comparant les éléments de diverses comètes, est arrivé à reconnaître qu'un certain nombre d'entre elles paraissent avoir une origine commune, qu'elles formaient avant de pénétrer dans la sphère d'attraction du Soleil, des groupes ou systèmes, ce qu'il prouve en faisant voir que ces astres ont eu jadis, se trouvant alors à une faible distance les unes des autres, un mouvement initial de même direction et de même vitesse. Du reste, dans sa pensée, les comètes à orbites elliptiques ou périodiques sont l'exception : l'immense majorité des comètes se meuvent dans des courbes à branches infinies. Elles nous arrivent, isolées ou par groupe, des profondeurs sidérales; elles sont envoyées dans notre système par quelque étoile, dont elles se sont assez éloignées pour échapper à la prépondérance de son attraction et tomber temporairement sous l'influence de l'attraction de notre propre Soleil. Mais à quel caractère M. Hœk a-t-il reconnu que certaines comètes émanent du même foyer, et peuvent être considérées comme ayant probablement une commune origine? Pour résoudre cette question difficile, l'astronome hollandais a comparé les éléments cométaires déterminés avec une suffisante exactitude, ceux des comètes cataloguées

depuis 1556 par exemple. Il a déterminé la position de leurs aphélies, et réuni d'abord entre elles les comètes dont les apparitions n'étaient pas séparées par des intervalles de plus de dix années, et dont les aphélies ne mesuraient pas, dans le ciel, une distance apparente ou angulaire de plus de 10 degrés. Il a cherché, de plus, si les orbites des comètes ainsi groupées trois par trois ou en plus grand nombre, n'avaient pas des points d'intersection communs.

Prenons, d'après Hœk, un premier exemple. Considérons les comètes de 1672, de 1677 et de 1683, puis les comètes 1860 III, 1863 I et 1863 IV. Voici les positions des aphélies de ces six comètes :

	Longitudes.	Latitudes.
1672	279°.4	69°.4
1677	286°.4	75°.7
1683	290°.8	83°.0
1860 III.	303°.1	73°.2
1863 I.	313°.2	73°.9
1863 IV.	313°.9	76°.4

Les différences en longitude mesurées sur un arc de grand cercle équivalent, pour chaque groupe, à un peu plus de 3 degrés. Il y a donc là une remarquable coïncidence. Mais, si l'on cherche les points d'intersection des orbites des comètes, on arrive à une coïncidence plus étonnante encore, car on trouve que ces points sont groupés dans une région du ciel dont l'étendue n'est pas de 2 degrés, vers 319° de longitude et 78° de latitude australe. En joignant le Soleil par une ligne droite à l'étoile γ de l'Hydre, on a la commune intersection des cinq orbites. Il est donc extrêmement vraisemblable que ces cinq astres émanent d'un même foyer cométaire. Si d'ailleurs on cherche à quelles distances du Soleil se sont trouvées dans le passé les comètes de ce système, on trouve que ces distances, d'abord très-inégales, se rapprochent de plus en plus, à mesure qu'on remonte à des siècles plus éloignés du nôtre. Voici, en effet, le résultat au-

quel M. Hœk arrive, en prenant pour unité de distance le rayon moyen de l'orbite de la Terre :

Années.	Comètes de	
	1677	1683
574	600	601.9
838	500	502.2
1287	400	402.4
1076.5	300	302.9
1464.7	200	203.6
1602	100	105.1

Années.	Comètes de		
	1860 III	1863 I	1863 IV
757. ...	600	600.4	600.2
1020.9. ..	500	500.6	500.4
1259.6. ..	400	400.7	400.5
1470. ...	300	300.9	300.8
1647.8. ..	200	201.1	201.3
1785. ...	100	101.8	102.1
1833.7. ..	50	52.8	53.3
1853.6. ..	20	24.4	25.5
1858. ...	10	15.9	17.4

Ces tableaux montrent que plus on remonte loin dans le passé, plus les deux comètes de 1677 et de 1683, d'une part, et les trois comètes de 1860 III, 1863 I et 1863 IV, d'autre part, se trouvaient en réalité rapprochées respectivement les unes des autres. Se sont-elles mises simultanément en route, ou bien l'époque de leur départ a-t-elle été distincte pour chacune d'elles? M. Hœk ne se prononce pas entre ces deux hypothèses. Seulement il fait voir qu'il suffirait par exemple d'admettre, entre les vitesses originelles des comètes de 1677 et de 1860, la minime différence de 66 centimètres par seconde, pour que, à leur arrivée respective dans notre système, le retard de la moins rapide eût produit une accumulation de 200 années. Ainsi, il n'est pas impossible que les deux comètes de 1677 et de 1860 aient quitté en même temps le foyer d'où elles émanent.

M. Hœk a étudié et reconnu d'autres systèmes cométaires dont nous avons donné le tableau détaillé dans notre ouvrage sur *les Comètes;* ce tableau comprend 38 comètes groupées en sept systèmes, ayant chacun un point radiant particulier; mais la place nous manque pour entrer ici dans de tels détails. Ce que nous devons retenir, c'est qu'il y a, selon ce savant,

de véritables groupes cométaires, c'est-à-dire des comètes liées ensemble par la communauté d'origine, par l'identité des mouvements à leurs points de départ, ou à leur entrée dans la sphère d'attraction du Soleil[1].

1. Dans la pensée de l'auteur de ces vues intéressantes, cela n'est point particulier aux comètes du seul monde solaire. « Chaque étoile, dit-il, possède son système cométaire qui lui est propre ; mais, sous l'influence des attractions planétaires ou des masses de matières cosmiques, ces corps quittent continuellement leur propre étoile principale, pour aller soit dans des ellipses permanentes, soit temporairement dans des paraboles ou des hyperboles, tourner autour d'un autre Soleil. » (*Monthly notices*, 1865.)

II

CONSTITUTION PHYSIQUE DES COMÈTES.

§ 1. ASPECT GÉNÉRAL DES COMÈTES. NÉBULOSITÉS, QUEUES, NOYAUX. LEURS DIMENSIONS.

Un noyau lumineux, d'apparence stellaire, enveloppé d'une partie nébuleuse ou diffuse, constitue ce qu'on nomme la *tête* de la comète ; souvent cette nébulosité se prolonge, tantôt en avant, tantôt en arrière, dans le sens du mouvement, formant une ou plusieurs traînées dont l'ensemble est communément nommé la *queue*. C'est sous cette apparence que le public est habitué à se représenter une comète, parce qu'en effet les comètes assez éclatantes pour être visibles à l'œil nu se montrent presque toujours formées de trois parties : l'étoile ou le noyau, la nébulosité ou la chevelure, la traînée vaporeuse ou la queue.

Mais toutes les comètes n'ont pas de noyau, ni de queue. Cette circonstance se présente fréquemment dans les comètes invisibles à l'œil nu ou télescopiques. Dès 1807, W. Herschel constatait le nombre relativement considérable des comètes dépourvues de noyau. « Sur 16 comètes télescopiques que j'ai examinées, disait-il, 14 n'offraient rien de remarquable à leur centre. » Le 24 juin 1865, la comète d'Encke paraissait comme une faible nébulosité, sans la plus légère condensation

de lumière au centre. Mais il faut ajouter qu'une même comète varie d'aspect, dans le seul cours d'une apparition, et à plus forte raison dans le cours de ses apparitions successives, s'il s'agit d'une comète périodique. Ainsi, la comète d'Encke que nous venons de citer, se montrait le 9 novembre 1871 comme une sorte de nébulosité en forme d'éventail, avec une condensation assez forte au sommet; un mois après, on y voyait un noyau brillant d'où partaient de chaque côté deux aigrettes vaporeuses. Ces variations d'aspect ont généralement deux causes : en premier lieu, les changements de position et de

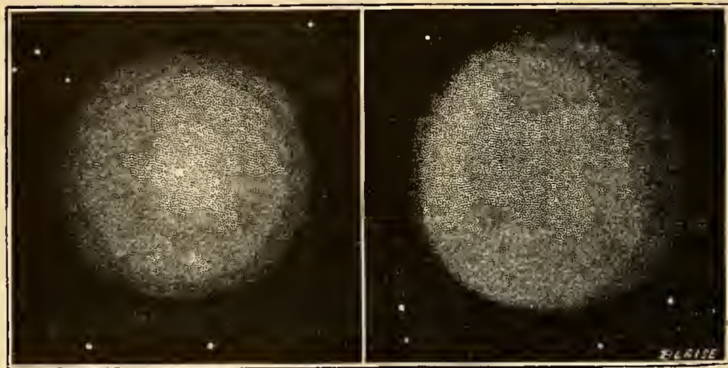


Fig. 207. — 1. Comète avec noyau et dépourvue de queue. — 2. Nébulosité cométaire sans queue, ni noyau.

distance de l'astre et de la Terre; en second lieu, des modifications réelles dans la forme et la structure de la comète même. Nous verrons plus loin des exemples de ces modifications singulières qui s'effectuent avec une grande rapidité.

On vient de voir qu'il y a des comètes dépourvues de queue. Mais la même comète, selon l'époque de l'observation ou la position qu'elle occupe sur son orbite, peut être vue avec ou sans queue. Donnons-en un exemple frappant. A son apparition de 1682, la comète de Halley n'avait aucune apparence de queue à la date du 26 août; trois jours après, le 30 août, elle en avait une de 30 degrés de longueur.

Le plus souvent la queue des comètes est unique : elle varie beaucoup de forme, de dimensions soit apparentes, soit réelles ; pour le même astre, elle change quelquefois avec une grande

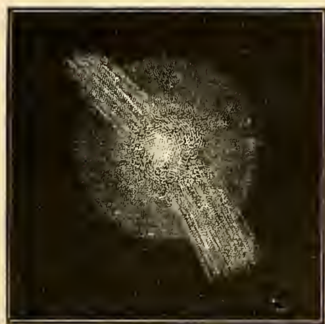


Fig. 208. Double queue de la comète de 1823.

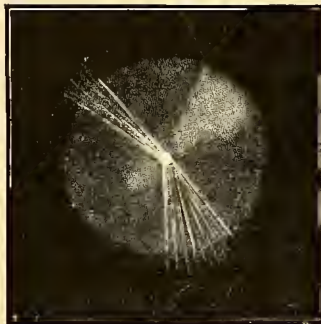


Fig. 209. Double queue de la comète de 1850.

rapidité ; mais elle est le plus souvent formée d'une seule traînée lumineuse. Cependant on peut citer plusieurs exemples



Fig. 210. Comète de 1744 ou de Chéseaux, à queues multiples, d'après un dessin du temps.

de queues doubles et même triples. Les comètes de 1807 et de 1843 avaient une double queue, ou, ce qui revient au même, une queue formée de deux branches de longueurs très-

inégales. Il en était de même de la comète de 1823, de celles de 1850 I, et de 1851 IV, qui toutes avaient deux queues inégales dont la moins longue était dirigée vers le Soleil.

La comète de 1744, ou de Chéseaux, n'avait pas moins de six queues; ou du moins, sa queue disposée en éventail était composée de six branches réunies près du noyau, puis se séparant sous forme de courbes lumineuses d'inégales lon-

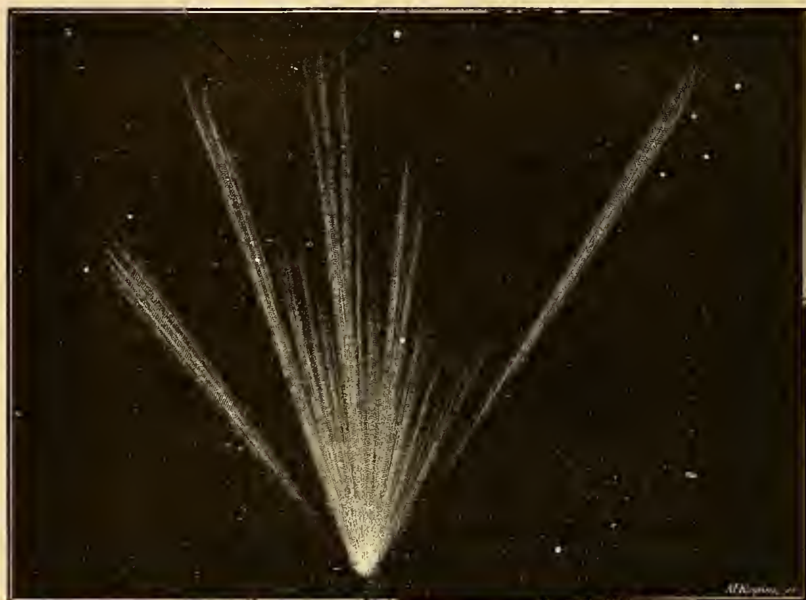


Fig. 211. Queue en éventail de la grande comète de 1861, d'après un dessin de M. G. Williams.

gueurs dont les rayons extrêmes comprenaient un angle de 60°. La grande comète de 1861 a offert une disposition semblable dans la nuit du 30 juin; seulement les rayons paraissaient rectilignes. Il ne faut pas oublier que cette apparence de traînées divergentes dans la queue d'une comète peut être due à un effet de perspective, quand la Terre et par conséquent l'observateur se trouvent à peu près dans la direction de la queue; c'est ce qui est arrivé notamment à la dernière comète, à la date que nous venons de citer.



COMÈTE DE DONATI

Développement des queues secondaires

D'après P. G. Bond. — 1. Le 3 octobre 1858. — 2. Le 5 octobre.

Quelquefois, outre la queue principale très-éclatante, on aperçoit de faibles traînées latérales, ou queues secondaires. On en voit un exemple dans la comète de 1769, qui avait trois queues, l'une fort longue, les deux autres beaucoup plus petites et moins larges, toutes les trois d'ailleurs rectilignes. La grande comète de Donati (1858) a également montré, outre sa queue principale recourbée en panache, une et puis deux queues rectilignes, mais situées du même côté et tangentes à la courbe de la première (voy. les planches XXVI, XXVIII et XXIX).

Il y a pour la direction de la queue principale des comètes une loi générale, du moins souffrant peu d'exceptions. Cette loi

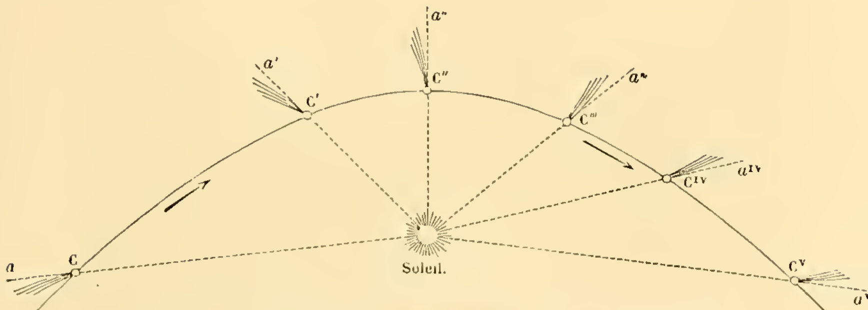


Fig. 212. Direction des queues cométaires à l'opposé du Soleil.

consiste en ce que la queue, outre qu'elle est toujours, quelle qu'en soit la forme, rectiligne ou courbe, située dans le plan de l'orbite, a une direction opposée à celle du Soleil. Elle est comme le prolongement du rayon vecteur mené du Soleil au noyau, si elle est rectiligne; elle est tangente à ce rayon, si elle est courbe, ainsi qu'on peut le voir dans la figure 212. Il résulte de là qu'avant son passage au périhélie, la comète est suivie par sa queue, qui semble au contraire précéder l'astre après ce passage.

Quant à la forme des queues, elle est aussi très-variable. On vient de voir qu'il en est de rectilignes; d'autres offrent une courbure très-marquée. Les unes se montrent comme un

ruban partout de même largeur ; les autres, larges près de la tête, vont en s'amincissant pour se terminer en pointe : tel était le cas de la comète découverte en 1873 par M. P. Henry, un des jeunes astronomes de l'observatoire de Paris (fig. 213); d'autres enfin, au contraire, s'élargissent à mesure qu'elles s'éloignent de l'astre. Mais, pour se rendre un compte de la forme réelle qui correspond à ces apparences, il faudrait dans chaque cas tenir compte des inévitables effets de perspective



Fig. 213. Comète de P. Henry, le 26 et le 29 août 1873.

dus à la position et aux distances de la Terre et de la comète. Les queues cométaires, en effet, ayant des longueurs extrêmement variées et quelquefois considérables, les distances où l'observateur se trouve, pour un instant donné, des points où commence et se termine une même queue, peuvent différer l'une de l'autre de plusieurs millions de lieues.

Il arrive fréquemment que les bords du cône qui constitue la queue d'une comète, sont plus lumineux que la partie centrale, comme si elle était évidée ou obscurcie à l'intérieur; mais le contraire se présente aussi ; par exemple, dans la

queue de la dernière comète de 1618 « on voyait, dit Pingré, une ligne ou un trait éclatant qui, tel que la moelle d'un arbre, s'étendait dans toute la longueur de la queue, en divisant en deux sa largeur. » La queue de la comète de 1769 (voy. la planche XXVI) avait aussi une apparence semblable.

Un mot de la longueur, apparente ou réelle, des queues cométaires. Voici un tableau qui suffira à donner une idée de l'étendue prodigieuse qu'atteignent parfois ces appendices singuliers :

		Dimensions des queues	
		apparentes en degrés.	réelles en kilomètres.
Comète de	1851 I	2° 1/2	—
—	1860 III	15°	35 000 000
—	1825	17°	—
—	1744	24°	30 000 000
—	1811 I	25°	176 000 000
—	1811 II	—	11 000 000
—	1456	57°	—
—	1843 I	65°	320 000 000
—	1858 IV	63°	88 000 000
—	1689	64°	—
—	1837	79°	—
—	1680	90°	240 000 000
—	1769	97°	64 000 000
—	1264	100°	—
—	1618	104°	80 000 000
—	1847 I	—	210 000 000
—	1861	118°	68 000 000

Revenons maintenant aux noyaux cométaires.

Examinés à l'œil nu, ou vus au télescope, ils présentent les plus grandes diversités d'éclat. Tandis que les noyaux de certaines comètes télescopiques atteignent à peine l'intensité lumineuse des étoiles de 11e à 12e grandeur, d'autres sont visibles à l'œil nu, et parmi ceux-là, on en a vu dont l'éclat surpassait celui des plus brillantes étoiles. Les anciennes observations parlent de comètes d'un éclat prodigieux, dont la lumière égalait ou surpassait la lumière du Soleil (comètes de 183, de 146 et de 136 av. J. C.). Ce sont évidemment des

exagérations. Mais il paraît assuré que les comètes de 1402, de 1500, de 1577 ont été vues en plein jour, ce qui suppose un éclat au moins égal à Vénus dans sa plus grande splendeur. La comète de Chéseaux, le 1er février 1744, surpassait Sirius ; aux premiers jours du mois de mars, elle était visible en plein jour. La comète de 1843 a été vue en Italie et au Mexique, en plein midi, à une très-faible distance ($5^{0}\,23'$) du centre du Soleil ; en se plaçant derrière un pan de mur qui masquait le Soleil, on aperçut même la queue sur une longueur de 4 à 5 degrés. Du reste, les variations de distance d'une comète et de la Terre sont si considérables et quelquefois si rapides, que le même astre passe par les intensités lumineuses les plus diverses ; d'où il suit que, pour comparer deux comètes sous ce rapport, il faut tenir compte de ces énormes écarts de distances. C'est une remarque qui s'applique à toutes les apparences cométaires.

On a pu mesurer approximativement les diamètres de quelques noyaux de comètes, et l'on a trouvé des dimensions qui varient entre 45 kilomètres (comète de 1798 I), 690 kilomètres (comète de 1811 I), 9000 kilomètres (comète de Donati), et enfin 45 000 kilomètres, dimensions du noyau de la comète de 1769. Mais ces mesures s'appliquent exclusivement à la partie stellaire de la tête, au noyau proprement dit. Les nébulosités ou atmosphères enveloppant le noyau sont beaucoup plus considérables. En 1828, la comète d'Encke mesurait 425 000 kilomètres ; la nébulosité de la grande comète de 1811, dont il vient d'être question, embrassait 1 800 000 kil., de sorte qu'en la supposant sphérique, son volume surpassait le double du volume du Soleil, tandis que son noyau n'était que la 6300e partie du globe terrestre, et par conséquent que la 8 000 000 000e partie du globe solaire.

Du reste, si nous donnons ces nombres, c'est afin qu'on se fasse une idée de l'étendue que peuvent occuper les matières dont une comète se compose ; mais il ne faut pas leur attribuer

une fixité, une invariabilité même approchée[1] : la forme et le volume de presque toutes les comètes sont dans un état de mobilité continuelle, surtout dans la portion de leurs orbites

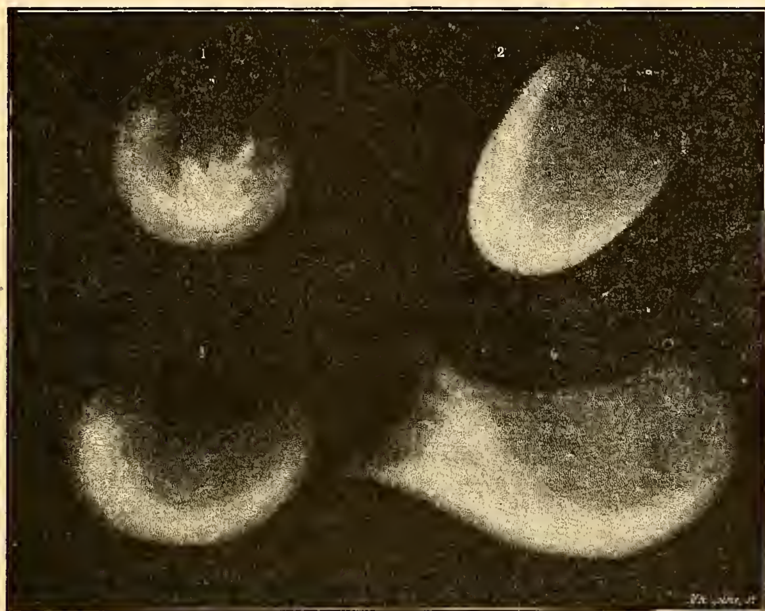


Fig. 214. Comète d'Encke : ses transformations d'après Schwabe. — 1. Le 19 octobre 1838. 2. Le 5 novembre. — 3. Le 10 novembre. — 4. Le 12 novembre.

qui est la plus voisine du Soleil, celle que nous pouvons généralement le mieux observer.

1. Dans la figure 214, on voit quels changements de forme et de dimensions la comète d'Encke a subis dans un intervalle de 24 jours seulement. Son diamètre, entre le 9 octobre et le 17 décembre, a été en diminuant considérablement : de 448 000, il est tombé à 4800 kilomètres, c'est-à-dire il s'est réduit à la 93[e] partie ; son volume supposé sphérique était devenu 81 000 fois moindre. La figure ferait croire à une augmentation; mais il faut songer que la distance de l'astre au Soleil et à la Terre diminuait rapidement pendant cette période de son cours.

§ 2. MASSE, DENSITÉ, LUMIÈRE DES COMÈTES. HYPOTHÈSES SUR LA FORMATION DES QUEUES.

Essayons maintenant d'aborder les questions, si nombreuses et si délicates, qui se rattachent à l'étude de la constitution physique des comètes.

Un mot d'abord sur la masse des comètes et sur la densité de la matière dont elles sont formées. Certaines comètes, en parcourant leurs orbites, se sont approchées de Jupiter, de Saturne, de Mars et de la Terre, assez près pour éprouver dans leurs mouvements des perturbations sensibles. Ces perturbations qui altèrent la forme et les dimensions de l'orbite ont été prédites ou calculées d'avance; et l'observation a prouvé que les accélérations ou les retards assignés par la théorie étaient dus, comme celle-ci le suppose, à l'action troublante des masses planétaires. Si les masses des comètes étaient du même ordre de grandeur que celles des planètes, leurs effets eussent été de même nature et l'on aurait réciproquement constaté dans les mouvements de Jupiter ou des autres planètes des altérations sensibles. Rien de pareil n'a été reconnu. On en a conclu que les masses des comètes en question sont insensibles. La comète de Lexell, par exemple, a passé en 1767 et 1769 fort près de Jupiter et du système de ses satellites, sans troubler en aucune façon les mouvements de ces corps. En 1770, elle s'est approchée de la Terre à six fois environ la distance de la Lune, et son action aurait dû, d'après les calculs de Laplace, altérer la durée de l'année sidérale de près de 3 secondes, si sa masse avait atteint la 5000e partie de la masse de la Terre. Aucune altération de ce genre n'a pu être constatée[1].

1. Babinet, s'appuyant sur certaines considérations optiques, considérait les comètes comme des *riens visibles*. Suivant lui, « la substance d'une

Dans des recherches fort remarquables sur la théorie des phénomènes cométaires, que nous analyserons plus loin, un de nos savants compatriotes, M. Édouard Roche, montre qu'il y a un rapport déterminé entre la distance de l'astre au Soleil, sa propre masse et le diamètre de la portion de sa nébulosité soumise à l'attraction du noyau, autrement dit le diamètre de son atmosphère véritable : cette relation a lieu quand les distances au Soleil sont assez éloignées pour que la force répulsive, apparente ou réelle, qui engendre les queues soit négligeable. Un autre élément — la force répulsive — s'y joint quand la comète approche de son périhélie, ou du moins dès qu'elle est assez voisine du Soleil, pour qu'il soit nécessaire de tenir compte de cette force. S'appuyant alors sur les observations micrométriques qui ont donné la mesure approchée du diamètre de la nébulosité des comètes de Donati et d'Encke, M. Roche arrive aux résultats que nous allons transcrire.

Rapportée à la masse de la Terre, la masse de la comète de Donati serait égale à 0.000047, c'est-à-dire à peu près à la vingt-millième partie de la première, ou 53 fois environ la masse de l'atmosphère terrestre. Évaluée en eau, elle équivaudrait à une sphère de 400 kilomètres de rayon : c'est un poids de 268 millions de milliards de tonnes. Nous voilà loin des quelques kilogrammes de Babinet!

La masse de la comète d'Encke, évaluée par la même méthode, serait la millième partie environ de la masse de la Terre.

comète ne pouvait être évaluée en densité à une quantité aussi élevée que celle de notre atmosphère, diminuée par l'énorme diviseur *quarante-cinq millions de milliards!* » Il s'agissait là de la comète d'Encke. Les mêmes considérations appliquées à la comète du Taureau (1825) donnaient pour la densité de cette comète un nombre infiniment moindre. Mais tout cela est basé sur l'extrême faiblesse de la lumière des nébulosités, qui laissaient voir au travers, sans les affaiblir, la première des étoiles de 5e, la seconde des étoiles de 11e grandeur. En bonne logique, cela ne peut s'appliquer aux noyaux eux-mêmes, surtout à ceux de ces comètes brillantes qu'on a pu voir à l'œil nu, en plein jour, dans le voisinage du Soleil.

Pour passer de la masse à la densité, il y aurait lieu évidemment de distinguer entre le noyau solide ou liquide, quand il y en a un de distinct, et l'atmosphère ou nébulosité de la comète. C'est à la densité de cette nébulosité ou des queues qu'on pourrait raisonnablement appliquer les calculs et les nombres de Babinet. La densité du noyau se calculerait aisément, il est vrai, en négligeant la masse qui l'enveloppe; mais, pour cela, il faudrait avoir des mesures précises de ce noyau, ce qui est difficile; on sait d'ailleurs que ses dimensions varient dans la même comète avec la distance au Soleil. La densité doit donc varier elle-même avec cette distance et ces dimensions. Les calculs de M. Roche sur la comète de Donati ont donné à ce savant, pour la densité du noyau (en octobre 1858), environ le huitième de la densité de l'eau, tandis que la densité de l'enveloppe nébuleuse n'était guère que la 154000e partie de celle de l'air atmosphérique.

D'autres questions, non moins intéressantes, mais dont la solution reste bien incertaine encore, sont celles qui concernent l'état physique de la matière cométaire. La lumière d'une comète est-elle la lumière réfléchie du Soleil, ou bien est-ce une lumière propre à l'astre? La matière du noyau est-elle solide, liquide ou gazeuse, ou encore est-elle constituée par une agglomération de corpuscules? Quelles sont les causes des transformations incessantes qu'on observe dans les comètes, qui font naître, développer, puis disparaître les queues?

Tâchons de résumer rapidement ce qu'on sait, ou tout au moins ce qu'on a pu conjecturer sur ces divers points.

On admettait encore, au siècle dernier, que les noyaux des comètes sont des corps opaques semblables aux globes planétaires, et réfléchissant comme ceux-ci la lumière du Soleil. On crut leur voir des phases, mais c'étaient évidemment des illusions optiques.

Arago appliqua le premier le polariscope à l'étude des lumières cométaires (comètes de 1819 et de 1839). Il trouva

qu'une certaine proportion des rayons lumineux étaient réfléchis spéculairement et provenaient du Soleil. Chacornac à Paris, Ronzoni et Govi en Italie, Poey à la Havane, Liais au Brésil, ont confirmé le fait en étudiant la lumière de la comète de Donati. La comète de Coggia (1874) a donné aussi des traces de polarisation tant dans le noyau que dans la queue, et même, selon M. Wright, « une portion considérable de la lumière de la comète dérivait du Soleil par voie de réflexion. »

Mais s'il paraît prouvé, par ces observations, que la lumière des comètes est en partie réfléchie, ce n'est point une raison pour admettre qu'elle n'est pas aussi en partie une lumière *sui generis* émise par un noyau incandescent[1].

L'analyse spectrale, appliquée aux lumières cométaires, confirme jusqu'à présent cette dernière manière de voir. En effet, il y a d'abord un fait commun à toutes les comètes dont la lumière a été analysée. Ce fait, c'est que leur spectre consiste principalement en un certain nombre de bandes lumineuses brillantes, séparée par d'assez larges intervalles obscurs. Le spectre continu, d'ailleurs très-faible, sur lequel se projetaient ces bandes n'existait ou du moins n'était visible que pour quelques-unes d'entre elles ; les comètes dont le noyau était très-faible, comme celui de la comète d'Encke, ou n'était pas encore assez lumineux (C. 1873 IV), n'ont pas donné de spectre continu. Il semble donc acquis que les bandes brillantes sont produites par la lumière des atmosphères ou des chevelures

1. Arago, s'appuyant sur le mode de disparition des comètes, qui s'éteignent pour ainsi dire en s'éloignant du Soleil et de la Terre, avant que leurs dimensions apparentes deviennent insensibles, en concluait que les comètes ne brillent pas d'une lumière propre. Cependant on peut faire observer que, si les nébulosités cométaires se condensent en s'éloignant du foyer solaire, par le fait du refroidissement de leurs molécules, cette condensation peut être assez grande pour intercepter, masquer la lumière du noyau. Enfin, n'est-il pas possible que l'incandescence du noyau, si elle est réelle, dépende en grande partie de l'action de la chaleur solaire, et qu'elle augmente à mesure que l'astre se rapproche du périhélie, pour diminuer après son passage?

cométaires. Ainsi les comètes à noyau, dont la lumière a pu être analysée par le prisme, seraient ainsi constituées :

Au centre de la nébulosité un noyau donnant un spectre continu. Cela indique-t-il nécessairement une matière liquide ou solide incandescente ? On pourrait l'affirmer si la continuité de ce spectre pouvait être regardée comme entière ; mais sa faiblesse est telle, qu'il est difficile de dire si la lumière dont il brille est une lumière propre due à l'incandescence de la matière qui compose le noyau, ou si elle est la lumière réfléchie du Soleil. Peut-être participe-t-elle de ces deux origines, surtout quand la comète, en s'approchant du Soleil, acquiert une



Fig. 215. Spectre de la comète 1873 IV (Henry) ; 1° le 26 août, 2° le 29 août.

température croissante ; les observations de polarisation par réflexion prouvent en tout cas qu'une partie au moins de cette lumière est réfléchie du Soleil.

Quant à la lumière des atmosphères et des queues, leur spectre à bandes brillantes dénote, dans la matière qui les forme, à la fois l'état gazeux et l'incandescence. Comme d'autre part les phénomènes des aigrettes émanées du noyau prouvent que les enveloppes atmosphériques se forment aux dépens de ce dernier, il semble bien difficile d'admettre l'incandescence pour l'atmosphère cométaire et pour les queues, si le noyau lui-même dont elles se forment incessamment ne jouit pas de cet état d'incandescence. Donc il est probable

que les noyaux cométaires, tout au moins dans le voisinage du périhélie, émettent, outre la lumière réfléchie du Soleil, de la lumière directe, émanée de leur propre substance.

Au point de vue chimique, les comètes, en petit nombre il est vrai, qui ont été analysées, ont une constitution très-peu complexe. C'est, ou du carbone simple, ou un composé du carbone, hydrogène carboné d'après les comparaisons faites par M. Huggins, oxyde de carbone ou acide carbonique d'après les recherches du P. Secchi. Ce dernier savant a donc eu raison de dire : « Il est très-remarquable que toutes les comètes observées jusqu'ici ont les bandes du carbone. »

Avant d'aborder, même succinctement, la théorie des phénomènes cométaires, il est indispensable que nous donnions une idée de ces phénomènes eux-mêmes, c'est-à-dire que nous décrivions les modifications singulières observées dans les comètes, pendant le cours de chacune de leurs évolutions.

Rappelons d'abord le fait du développement des queues. Quand une comète peut être observée quelque temps avant son passage au périhélie, ou elle se réduit à une simple nébulosité, de forme à peu près arrondie, ou si elle présente déjà une traînée lumineuse, cette traînée est pour ainsi dire rudimentaire. Elle se développe, s'allonge, à mesure que l'astre se rapproche du Soleil, pour décroître ensuite dans la dernière partie de son cours et disparaître finalement. (Voy. la figure 213.)

Mais la nébulosité qui entoure le noyau est sujette elle-même, dans le même intervalle de temps, à des transformations continuelles, et paraissant avoir une relation étroite avec le développement de cette dernière. La première comète où de tels changements aient été observés est celle de 1744 ou de Chéseaux; mais ils n'ont été sérieusement étudiés qu'à partir de 1835, où l'on vit la tête de la comète de Halley prendre d'un jour à l'autre les aspects les plus variés : du noyau s'échappaient des aigrettes lumineuses, d'abord dans la direc-

tion du rayon vecteur et à l'opposé du Soleil, puis dans une direction sensiblement différente, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre de ce rayon. C'est à Bessel qu'est due l'observation de cette oscillation singulière, que Chacornac a constatée de nouveau dans la grande comète de 1862.

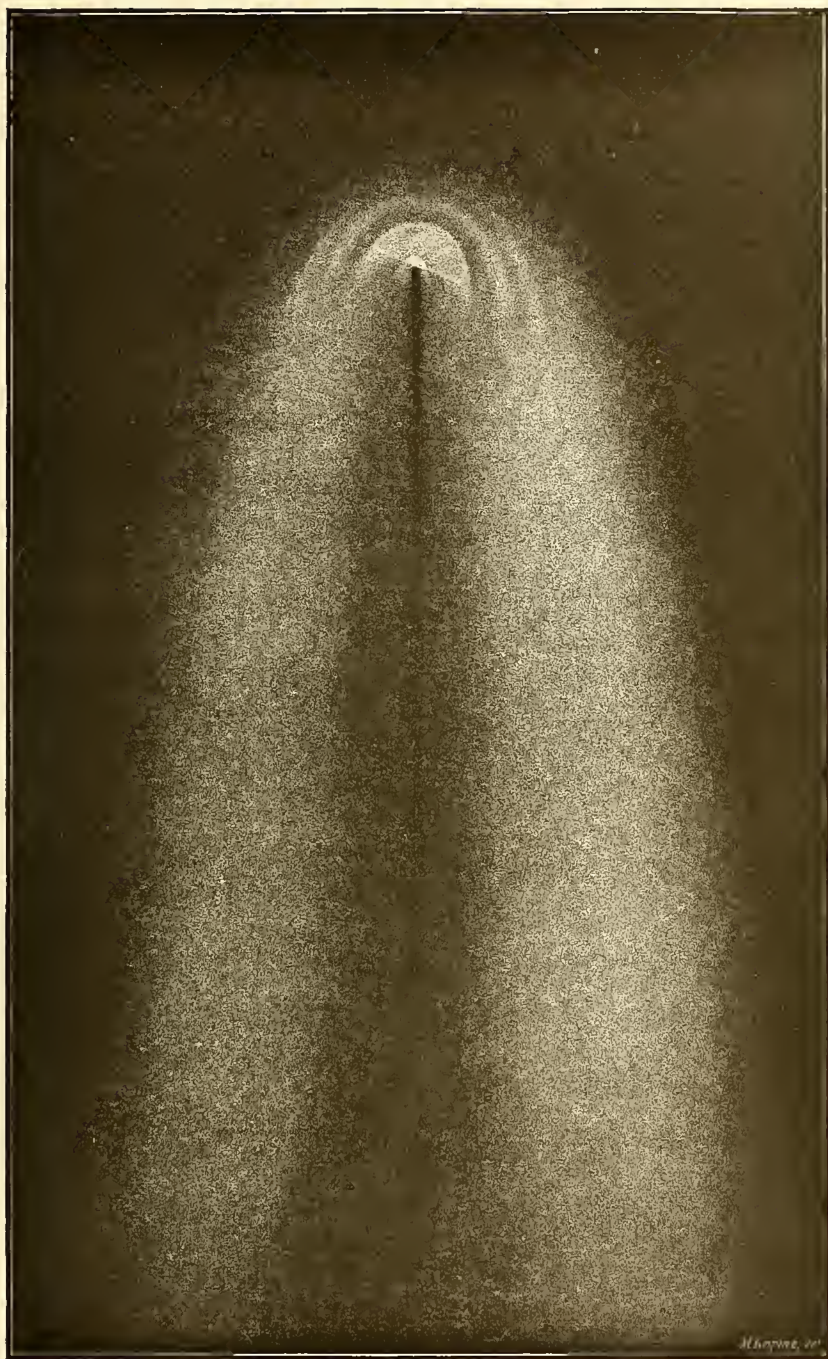
Trois autres comètes, celles de Donati (1858), celles de 1860 III et de 1861 II, ont bien également été le siége d'émis-



Fig. 216. Comète de Donati, le 6 octobre 1858. Formation des enveloppes lumineuses.

Fig. 217. La même, le 8 octobre, d'après les dessins de Bond.

sions vaporeuses émanées du noyau ; mais ces jets lumineux avaient plutôt l'apparence d'enveloppes concentriques et affectaient au contraire une direction permanente. Le caractère commun de ces émissions nucléales était celui-ci : après s'être éloignées progressivement du foyer lumineux, et toujours à peu près à l'opposé du Soleil, elles semblaient s'arrêter, puis être refoulées latéralement et en sens inverse, de manière à former la queue par une sorte d'écoulement continu. Les dessins que nous donnons, d'après Bond et Chacornac, de



TÊTE ET NOYAU DE LA COMÈTE DE DONATI
Le 9 octobre 1858
D'après les observations faites à Harvard College
Par G. P. Bond.

l'aspect qu'ont offert, au télescope, les têtes des comètes de

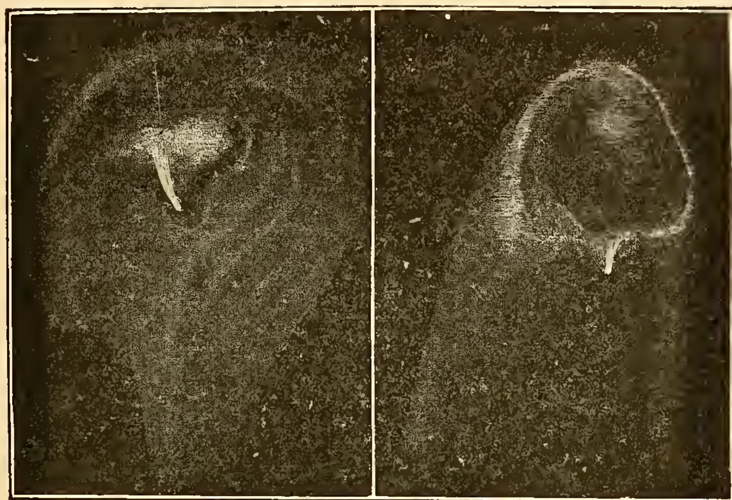


Fig. 218. Aigrettes ou secteurs lumineux de la comète de 1862 : 1° le 23 août, à 1 heure du matin ; 2° le même jour, à 9 heures du soir.

1858 et de 1862, donneront une idée suffisante des diverses transformations dont nous venons de parler.



Fig. 219. Évolutions des aigrettes lumineuses de la comète de 1862 : 1° le 23 août, à 9 heures du soir ; 2° le 24 août, à la même heure.

La comète de 1874 ou de Coggia a présenté aussi, dans le court intervalle de sa visibilité en Europe, les transforma-

tions les plus singulières. Vers les derniers jours, notamment le 14 juillet, des secteurs lumineux s'élançaient à droite et à gauche du noyau, se recourbant pour aller former les parties latérales de la queue. Il semble aussi, à cette date, que la



Fig. 220. La comète de Coggia, le 10 juin 1874. Vue d'ensemble d'après un dessin de M. G. Rayet.

comète est sur le point de se dédoubler. Nous avons donné en détail l'histoire de ces changements dans notre ouvrage LES COMÈTES : la place nous manque ici et nous devons nous borner à reproduire trois vues télescopiques de l'astre, et à donner ces rapides indications.

Mais quelle est la cause de ces modifications si rapides, si étonnantes? Quelle est la cause de la naissance et du développement des queues; sous l'influence de quelles forces ont lieu ces émissions successives de matière, puis ce refoulement qui paraît évidemment lier les deux ordres de phénomènes? Avant qu'on connût en détail les phénomènes des émissions nucléales, de la formation des aigrettes, des secteurs ou auréoles lumineuses, on s'était déjà préoccupé du problème de l'explication des queues cométaires. Depuis, on a fait de nouvelles hypothèses pour expliquer les nouveaux phénomènes observés, mais aucune des théories proposées n'a encore rallié tous les astronomes. Nous devons donc nous borner à donner de chacune d'elles une idée sommaire.

D'après Apien, Cardan, Tycho-Brahé, la queue d'une comète n'est qu'une simple apparence optique due à la réfraction que subit la lumière du Soleil, quand elle traverse le milieu gazeux et transparent de la nébulosité qui environne le noyau. Cette idée a été reprise de nos jours et soutenue par Gergonne, qui a fait voir qu'on peut rendre compte des formes variées de l'appendice cométaire, par celles des caustiques par réfraction que produit la masse nébuleuse et réfringente, selon la nature optique des couches traversées par la lumière. Mais cela suppose un milieu réfléchissant s'étendant à une grande distance du noyau et qu'on ne peut admettre à cette distance, ni comme une atmosphère de la comète, ni comme une extension de l'atmosphère du Soleil.

Il paraît plus probable et on peut même considérer comme certain que les queues ont une existence réelle, que ce sont des agglomérations de corpuscules détachés de la nébulosité cométaire par une sorte de force répulsive et entraînées hors de l'attraction du noyau, dont elles suivent le mouvement en vertu de leur seule vitesse acquise. Mais qu'est-ce que cette force répulsive? Est-ce une force réelle due à l'action impul-

sive des radiations solaires comme l'ont pensé Kepler, Euler, Laplace? Cette action qui se concevait aisément dans la théorie de l'émission, est difficile à admettre aujourd'hui que la théorie des ondulations lumineuses l'emporte définitivement.



Fig. 221. La comète de Coggia, le 22 juin 1874, d'après M. Rayet.

Est-ce une répulsion apparente due à la différence de pesanteur de la matière qui forme la queue et du milieu où elle se meut? Telle était la manière de voir de Newton et, après lui, de Hooke, de Boscowitch; il comparait l'émission de la queue à l'opposé du Soleil, à l'ascension des vapeurs qui s'élèvent, en vertu de leur légèreté spécifique, au-dessus des couches

plus denses de l'atmosphère. Est-ce, comme le pense sir John Herschel, une action de l'électricité positive du Soleil, laquelle, à mesure que la comète s'approche de l'astre, l'électrise par influence? Le noyau se charge d'électricité négative, tandis



Fig. 222. La comète de Coggia, le 14 juillet 1874, d'après M. Rayet

que la nébulosité électrisée positivement l'électrise par influence? Le noyau se chargerait ainsi d'électricité négative, tandis que la nébulosité électrisée positivement serait refoulée loin de la source, c'est-à-dire à l'opposé du Soleil, et irait former la queue. Enfin, est-ce une force polaire, analogue au magnétisme, comme l'a soutenu Bessel, qui voyait dans cette

hypothèse un moyen d'expliquer les balancements des aigrettes lumineuses?

Il y a quelques années, un géomètre français, M. E. Roche, professeur à la Faculté des sciences de Montpellier, a repris, par l'analyse mathématique, l'étude de la figure des comètes. En n'admettant d'abord que les effets ordinaires de la chaleur solaire et de la force de gravitation, ce savant reconnut qu'on pouvait expliquer ainsi la formation des auréoles successives, détachées du noyau par la chaleur; que, par un effet analogue à celui des marées, la matière cométaire ainsi soulevée et formant d'abord deux bourrelets, l'un du côté du Soleil et l'autre à l'opposé, devait, en dépassant les limites de l'attraction nucléale, s'écouler de part et d'autre et donner lieu à deux queues symétriquement placées. L'hypothèse était donc incomplète, puisque en général la queue existe seulement à l'opposé du Soleil. Mais, à la même époque, M. Faye discutant les théories proposées et les récentes observations de la comète de Donati, se prononçait pour l'hypothèse d'une force répulsive réelle, due à la chaleur solaire, agissant en raison inverse du carré de la distance, proportionnellement non pas aux masses, mais aux surfaces, sur la matière excessivement raréfiée. Le savant astronome fit voir que cette hypothèse rendait compte, non-seulement du développement des queues par le refoulement des aigrettes et des auréoles, de leur courbure, mais encore de l'accélération du mouvement de l'astre, telle que l'observation l'a constatée pour la comète d'Encke, et depuis, pour celle de Faye. En effet, en introduisant cette force nouvelle dans ses formules, M. E. Roche a montré que la théorie et l'observation donnaient sensiblement les mêmes formes pour les appendices cométaires. Mais il reste toujours à savoir, et c'est là une question qui est du ressort de l'expérience, si une telle force physique accompagne réellement l'émission calorique d'une source aussi puissante que la chaleur solaire.

Enfin tout récemment, un des physiciens contemporains les plus distingués, M. Tyndall, se fondant sur des expériences aussi délicates qu'ingénieuses, a proposé pour expliquer les phénomènes cométaires, une théorie qu'on peut caractériser en la nommant *théorie actinique*. Ce savant considère en effet les comètes comme formées d'une vapeur décomposable sous l'action des radiations solaires; la tête et la queue visibles sont un nuage actinique résultant de cette décomposition ; la contexture des nuages actiniques est la révélation de celle d'une comète. D'après cette théorie, la queue n'est pas une matière projetée, mais une matière précipitée sur les rayons solaires qui traversent l'atmosphère de la comète.

A ces questions d'un grand intérêt, et, il faut le dire, encore bien obscures, s'en joignent d'autres qui ont eu, à plusieurs reprises, le privilége de captiver l'attention du public. Nous avons vu que la comète périodique de Gambart a failli, en 1832, rencontrer la Terre[1]. Que fût-il résulté d'un pareil événement? Il y a un siècle, les savants considéraient encore les comètes comme des astres dont la rencontre avec le globe, ou avec une planète quelconque, pouvait amener pour ces derniers corps les plus funestes conséquences.

« Quand on considère le mouvement des comètes, dit Lambert dans ses *Lettres cosmologiques* (édition Mérian, p. 5), et que l'on réfléchit sur les loix de la pesanteur, on s'aperçoit sans peine que leur approche de la terre pourroit y causer les événements les plus sinistres, y ramener le déluge universel, ou la faire périr dans un déluge de feu, la briser en menue poussière, ou du moins la détourner de son orbite, lui enlever sa lune, qui pis est, l'enlever elle-même, l'emporter au delà des régions de Saturne, et nous faire souffrir un hiver de

1. On verra bientôt que cette rencontre s'est probablement effectuée, partiellement tout au moins, en novembre 1872. Le phénomène s'est borné à une magnifique pluie d'étoiles filantes, aussi splendide qu'inoffensive.

plusieurs siècles, auquel ni les hommes, ni les animaux ne seroient capables de résister. Les queues mêmes des comètes ne seroient plus des phénomènes sans conséquence, si, en s'éloignant de nous, les comètes les laissoient, en tout ou en partie, dans notre atmosphère. »

Maupertuis, à la même époque, avait déjà décrit à peu près de la même manière les accidents que la crainte d'une rencontre de la Terre et d'une comète faisait imaginer alors aux astronomes. Seulement, à côté des inconvénients possibles, il énumérait les avantages qu'on pourrait retirer de l'action à distance de ces astres, comme le changement des saisons en un printemps perpétuel, l'acquisition de nouvelles lunes, d'un anneau à l'instar de celui de Saturne. Puis il ajoutait :

« Quelque dangereux que seroit le choc d'une comète, elle pourroit être si petite, qu'elle ne seroit funeste qu'à la partie de la terre qu'elle frapperoit : peut-être en serions-nous quittes pour quelque royaume écrasé, pendant que le reste de la terre jouiroit des raretés qu'un corps qui vient de si loin y apporteroit. On seroit peut-être bien surpris de trouver que les débris de ces masses que nous méprisons, seroient formés d'or et de diamants ; mais lesquels seroient les plus étonnés, de nous ou des habitants que la comète jetteroit sur notre terre? Quelle figure nous nous trouverions les uns aux autres. » (*Lettres sur la comète.*)

Aujourd'hui les astronomes semblent bien revenus de ces craintes. Non-seulement, selon eux, la probabilité du choc est si faible qu'il n'y a pas lieu de s'inquiéter d'un tel événement; mais encore la masse de la plupart des comètes paraît, nous l'avons vu, une si petite fraction de la masse du globe terrestre, que le choc dont il s'agit serait tout à fait insensible.

III

LES ÉTOILES FILANTES.

§ 1. ASPECT DES MÉTÉORES, TRAÎNÉES, COULEURS, NOMBRE HORAIRE.

Lorsque j'étais enfant, j'aimais beaucoup à contempler, en compagnie d'un ou deux camarades, couchés comme moi sur l'herbe, le ciel étincelant des belles et profondes nuits d'été. Nous devisions ensemble sur les étoiles et nous nous demandions ce que pouvaient être ces milliers de feux, dont chacun semble un œil qui des profondeurs infinies de l'éther plonge son regard vers nous. Une chose surtout nous étonnait grandement dans ce spectacle, dont la mise en scène est à la fois si simple et si splendide : c'était de voir, de temps à autre, une étoile s'élancer tout à coup, décrire en silence un long trait de feu et aussitôt disparaître. Était-ce une des étoiles qui brillaient auparavant dans le ciel, que nous voyions ainsi s'évanouir, ou bien un feu nouvellement allumé qui ne faisait que passer devant nous ? Nous eussions été bien embarrassés de répondre à ces questions, dont la pensée nous était si naturellement suggérée par la vue du phénomène ; d'ailleurs, nous avions entendu dire que chaque étoile filante est l'âme d'un trépassé qui s'élance de la terre au séjour céleste, et, sans ajouter grande foi à cette explication naïve, elle ne laissait

pas que d'avoir sur nos jeunes cerveaux une certaine influence, en nous plongeant dans de longues et vagues rêveries.

Depuis, je ne me suis pas contenté de la légende populaire, bien qu'elle ait servi de thème à l'une des plus jolies et des plus poétiques chansons de notre Béranger; et, bien que j'aime à me reporter aux souvenirs de l'enfance, j'avoue que je n'éprouve aucun regret, aucune désillusion à voir la fiction faire place à la réalité, l'explication mystique et superstitieuse à la théorie scientifique et naturelle, le phénomène des étoiles filantes se rattacher au système du monde, et devenir, dans toute l'acception du mot, un phénomène cosmique : on va voir que la poésie et l'imagination n'y perdent rien.

Il ne se passe pas de nuits, quand le ciel est complétement découvert de nuages, où un observateur, posté de manière à



Fig. 223. Étoiles filantes à traînées rectilignes fusiformes.

embrasser tout l'horizon céleste, n'aperçoive une ou plusieurs *étoiles filantes*. Tout le monde sait qu'on nomme ainsi des points lumineux qui, apparaissant subitement au milieu des étoiles, semblent glisser sur la voûte du firmament, en laissant le plus souvent l'impression d'un sillon de feu qui s'évanouit après une durée variable. Les étoiles filantes ont l'aspect des étoiles ordinaires ; et, comme celles-ci, elles offrent, au point de vue de l'éclat de leur lumière, divers ordres de grandeur. Il n'est pas rare d'en voir qui atteignent le premier ordre, et qui brillent aux yeux avec les dimensions apparentes

des planètes les plus étincelantes, comme Jupiter ou Vénus [1]. D'autres sont à peine perceptibles et exigent, pour être vues, toute l'attention des observateurs qui se livrent à l'étude de cette branche spéciale de l'astronomie; il en est enfin qui ne sont visibles qu'au télescope.

Le sillon lumineux que l'étoile laisse derrière elle, indique très-nettement la direction de sa course apparente ou *trajectoire*. Est-ce une traînée réelle, ou bien ne doit-on voir là qu'une pure apparence, due à la persistance sur la rétine de l'impression un peu vive que produit le mouvement rapide



Fig. 224. Traînées sinueuses et trajectoires curvilignes[2].

d'un point lumineux? Il est probable que le phénomène est très-souvent, sinon toujours, le résultat simultané de ces deux

1. Un catalogue des météores lumineux pour les années 1866, 67 et 68, publié par un comité de savants anglais, renferme 195 météores dont l'éclat égale ou dépasse la 3e grandeur. Sur ce nombre, on en compte 115 de la 1re, 53 de la 2e et 46 de la 3e. En outre, 12 ont dépassé l'éclat des étoiles les plus brillantes, et parmi eux 2 atteignaient le disque de la Lune en grosseur, 8 avaient le $\frac{1}{4}$ ou la $\frac{1}{2}$ de ce disque; 1 était évalué à 2 ou 3 fois l'éclat de Vénus, et 1 enfin égalait 6 fois celui de Jupiter. C'est à ces météores brillants qu'on réserve communément le nom de *bolides*. 5 météores ont offert pendant la durée de leur apparition, augmentant ou diminuant la vivacité de leur lumière, le curieux spectacle d'un changement d'éclat.

2. Le n° 1 de la figure 224 est une étoile filante à traînée sinueuse, observée à Londres, le 15 septembre 1867, par M. Finch, dans la constellation du Taureau. D'abord blanche pendant le premier quart de son apparition, elle passa ensuite au rouge, en laissant derrière une traînée de teinte rou-

causes, et ce qui le prouve, c'est qu'on cite des cas nombreux où la traînée phosphorescente est restée visible longtemps après la disparition de l'étoile. La forme de la traînée est tantôt celle d'une ligne droite, tantôt celle d'un arc légèrement courbé, et varie en définitive avec la forme de la trajectoire elle-même. Les unes ont dans toute leur longueur une épaisseur uniforme; d'autres s'amincissent au début, et d'autres à la fin de l'apparition ; quelquefois elles affectent l'apparence d'un fuseau allongé notablement plus large au milieu qu'aux extrémités de la traînée (fig. 223). On a vu assez souvent des étoiles filantes décrire des courbes sinueuses, rentrantes ou



Fig. 225. Changements dans la orme d'une traînée[1]

serpentantes (fig. 224), mais tout ceci ne doit s'entendre que des formes apparentes des trajectoires ou des traînées, puis-

geâtre. Le n° 2, observé par MM. G. Haley et W. Miller à Glascow, dans la soirée du :9 octobre 1867, avait un noyau allongé, brillant d'une lumière jaune et rouge, et suivi de sillons et d'étincelles rouges. Il décrivit une courte trajectoire, fortement courbée, comme l'indique la flèche.

1. Un météore, observé à Birmingham par M. Wood, le 11 août 1868 à $11^h\ 25^m$, avait un éclat pareil à celui de Vénus et une couleur orangé-verdâtre. Il laissa après lui une traînée d'un vert d'émeraude (fig. 225), de 14° de long sur 6′ de large, qui affecta d'abord une forme massive et à peu près rectiligne; 10 secondes après, elle s'était transformée en une ligne serpentante, et enfin 20 secondes plus tard, elle prit l'aspect d'un demi cercle. Elle resta ainsi visible une demi-minute. Ces transformations et cette durée prouvent que les traînées sont souvent des objets réels, des résidus sans doute gazeux de l'inflammation de l'étoile filante.

que, à moins d'être en réalité rectilignes, elles sont nécessairement déformées par l'effet de la perspective.

La longueur des arcs décrits par les étoiles filantes, la durée de leur visibilité sont très-variables, ainsi que leur éclat. Les trajectoires atteignent quelquefois jusqu'à 80°, et d'autres ne dépassent pas $\frac{1}{2}$ degré ; la durée de l'apparition égale souvent une fraction de seconde, et atteint jusqu'à une $\frac{1}{2}$ minute. Quand le diamètre apparent est appréciable à l'œil nu, que l'étoile a l'aspect d'un globe enflammé, qui se meut alors le plus souvent avec lenteur, on donne au météore le nom de *bolide ;* mais on ne sait pas d'une manière positive s'il y a une différence essentielle entre les bolides et les étoiles filantes. On croit plutôt à l'identité d'origine des deux espèces de météores, qui ne différeraient entre eux que par certains caractères physiques, et notamment par les circonstances de leur apparition. La lumière des uns et des autres est souvent colorée, bien que la couleur blanche soit celle qu'on observe le plus communément[1] : il y a des étoiles filantes jaunes ; il en est de rouges, de bleues, de vertes, et quelquefois ces couleurs se succèdent pendant la durée de l'apparition du météore, comme il est arrivé (voy. la note de la page 595) à l'étoile filante représentée dans la figure 224.

Le nombre des étoiles filantes qu'on peut observer chaque nuit est très-variable. Il y a d'abord des circonstances indépendantes de leurs apparitions, qui influent naturellement sur leur visibilité : les nuits sont plus ou moins longues, selon

1. Parmi les 195 météores dont le catalogue anglais cité plus haut donne la couleur, il y en avait
106 blanches;
15 rouges ou d'un rouge-jaunâtre;
26 jaunes ou d'un jaune-orangé;
36 bleues ou d'un blanc-bleuâtre;
6 vertes ou d'un vert-bleuâtre.
Sur ce même nombre de 195 étoiles filantes, une présenta les couleurs de l'arc-en-ciel, et 5 passèrent successivement par diverses couleurs.

l'époque de l'année où l'on observe; le ciel est plus ou moins pur; la clarté répandue par la Lune dans l'atmosphère peut, selon l'âge de la lunaison, empêcher à des degrés divers les plus petits météores d'être perceptibles à la vue simple. Mais, outre ces causes tout extérieures au phénomène, il y en a qui semblent lui être propres, et qui rendent les apparitions d'étoiles filantes très-nombreuses à certaines époques, tandis qu'elles sont relativement assez rares le reste du temps. En certaines nuits, et à certaines heures de la nuit, elles se succèdent avec tant de rapidité, qu'on a donné au phénomène le nom caractéristique de *pluie*, d'*averse météorique*, et l'ensemble des étoiles qui se montrent ainsi à la fois dans le ciel en quelques heures, se désigne sous le nom d'*essaim d'étoiles filantes*. Au commencement de ce siècle, on ne connaissait guère encore que deux ou trois essaims, qu'on distinguait par la date du mois ou du jour de leur apparition : il y avait l'essaim du 10 août, l'essaim du 13 novembre, etc. Quant aux étoiles filantes, beaucoup plus rares, qui apparaissaient comme isolées dans les autres nuits de l'année, on les distinguait des étoiles des essaims par la dénomination d'*étoiles sporadiques*, c'est-à-dire dispersées, disséminées.

Mais, depuis qu'on a étudié et observé les météores avec plus de soin, de persévérance et d'exactitude, on est parvenu à reconnaître un grand nombre d'autres essaims, moins importants en général que les premiers, mais offrant les mêmes caractères, et notamment celui d'une périodicité à peu près régulière, de sorte que chacun d'eux redevient visible chaque année, quand la Terre est elle-même revenue au même point déterminé de son orbite. La distinction des météores en essaims et en étoiles sporadiques tend donc peu à peu à disparaître, à mesure que les étoiles qu'on croyait isolées se rangent en groupes nouveaux, ou peuvent se rattacher à des groupes déjà connus.

Avant de décrire quelques-unes des apparitions les plus

remarquables, disons un mot du nombre probable des étoiles filantes qui se présentent à la Terre dans le cours d'une année. En laissant de côté les quelques nuits où ont lieu les pluies météoriques extraordinaires, divers observateurs ont fixé à 5 ou 6, d'autres à 7 ou 8, le nombre moyen des étoiles filantes qu'un seul observateur peut voir dans l'intervalle d'une heure, en un même lieu; mais il paraît certain que ce nombre doit être augmenté. Depuis qu'on a compris l'importance de ces observations, on s'est attaché à les recenser plus complétement en multipliant le nombre des observateurs, et en fixant à chacun d'eux une région particulière du ciel à explorer. Le professeur Newton (d'Yale Collége, États-Unis) s'est ainsi assuré que douze observateurs voient en moyenne cinq fois autant d'étoiles filantes qu'un seul. Il évalue à 30 environ le nombre horaire moyen, pour un seul horizon. Mais comme chaque horizon n'embrasse évidemment qu'un cône de visibilité bien inférieur à l'espace céleste découvert au-dessus de lui, et que l'épaisseur des couches aériennes masque un grand nombre de météores, il a calculé qu'il faudrait 10 000 stations semblables fixées en divers points de la Terre, pour ne laisser échapper aucune étoile filante. Il est ainsi conduit à admettre une moyenne de 30 000 étoiles filantes, visibles à l'œil nu, en une heure, ou du moins qu'on pourrait apercevoir à l'œil nu, s'il faisait nuit sur tout le globe terrestre, et si la voûte du ciel, parfaitement sereine, était observée à la fois dans 10 000 stations composées chacune de 12 observateurs. Cela fait plus de 260 millions d'étoiles filantes par année[1].

Ce n'est pas tout. Il ne s'agit là que des étoiles visibles à l'œil nu. Or, de certaines observations télescopiques de météores,

1. M. Herrick (de New-Haven, Connecticut), un des savants qui se sont le plus occupés de cette branche de l'astronomie, croyait que « le nombre moyen des étoiles filantes qui, dans les mêmes hypothèses, seraient visibles chaque jour dans toute l'atmosphère et à l'œil nu, surpasse probablement 2 000 000. C'est à peu de chose près le triple de l'évaluation du professeur Newton.

M. Newton conclut que les étoiles filantes invisibles à l'œil nu (mais perceptibles à l'aide d'un télescope grossissant environ 60 fois) doivent être 250 fois plus nombreuses que les autres. On voit donc que c'est par millions qu'il faudrait évaluer le nombre horaire, par dizaines de milliards le nombre des météores dont les feux, visibles ou invisibles, sillonnent la voûte azurée dans le cours de chaque année de la Terre.

§ 2. PLUIES OU AVERSES D'ÉTOILES FILANTES. ESSAIMS MÉTÉORIQUES.

Arrivons maintenant aux apparitions en masses, à celles qui ont fait considérer les étoiles filantes comme formant parfois de véritables agglomérations, des essaims météoriques, et auxquelles on réserve plus particulièrement les noms de *pluies*, de *flux* ou d'*averses*. Ce n'est pas d'ailleurs, comme on va le voir, seulement par le nombre des météores que ces apparitions sont remarquables, mais encore et principalement par le fait qu'elles reviennent périodiquement, soit à date à peu près fixe après un intervalle d'une année, soit après un laps de temps plus considérable, embrassant plusieurs années successives.

Les premières pluies d'étoiles filantes dont la périodicité ait été constatée, sont aussi les deux plus importantes par le nombre des météores : l'une tombe vers le 10 août ; l'autre pendant les nuits du 12 au 14 novembre.

Bien avant que la science se soit occupée de ces phénomènes, l'apparition des étoiles filantes d'août était populaire : on la connaissait en Irlande sous le nom de *pluie de Saint-Laurent*, les traînées lumineuses des météores n'étant autre chose pour les naïves populations de l'Irlande catholique, que les larmes brûlantes du martyr dont la fête tombe précisément le 10 août. C'est sans doute à une coïncidence analogue entre un phénomène naturel et des croyances religieuses,

qu'est due l'ancienne tradition répandue, dit-on, dans les montagnes de la Thessalie : pendant la nuit du 6 août, ou de la *Transfiguration*, le ciel s'entr'ouvre, et à travers cette ouverture apparaissent des flambeaux[1]. Toutefois, les observations un peu précises de l'averse du 10 août ne remontent qu'à la fin du dernier siècle, et c'est seulement en 1836 ou 1837, que MM. Quételet et Herrick en ont nettement accusé la périodicité. La nuit du 9 au 10 août n'est d'ailleurs que la nuit du maximum ; mais les nuits précédentes et les nuits suivantes sont elles-mêmes marquées par un nombre d'étoiles filantes dépassant le nombre moyen des nuits ordinaires. Parmi les observations les plus remarquables de cette période, citons celles de 1839, où Capocci et Nobile ont compté, à Naples, 1000 étoiles filantes en quatre heures ; celles faites en 1836, à Bourbonne-les-Bains, par M. Walferdin qui en a dénombré 316 en une heure. En comparant entre elles les observations des quarante dernières années, on trouve que le phénomène offre des variations notables : très-faible en 1838, 1846, 1854, 1862, 1870, il a eu au contraire des recrudescences marquées en 1840, 1844, 1848, 1863, 1871 et 1872[2].

La période de novembre a fourni des faits plus extraordinaires encore, et les apparitions du 12 novembre 1799 et de la nuit du 12 au 13 novembre 1833 sont dignes d'être mentionnées. Humboldt et Bonpland, qui se trouvaient à Cumana à la première de ces dates, rapportent qu'entre deux et quatre heures du matin, le ciel fut sillonné d'innombrables traînées lumineuses, qui traversaient incessamment, du nord au sud,

1. Les annales chinoises de Ma-tuan-lin font mention, depuis l'année 830, de pluies de météores correspondant au phénomène d'août, « assez abondantes pour qu'il eût été impossible de compter toutes les étoiles. »

2. On a cru remarquer une certaine périodicité dans ces fluctuations, notamment pour les époques de maxima, qui auraient une période de 8 années. Mais la difficulté de comparer des observations faites dans des circonstances souvent très-diverses, ne permet point qu'on se prononce encore sur cette question.

la voûte céleste. On aurait cru voir un brillant feu d'artifice tiré à une hauteur immense; de gros bolides ayant parfois un diamètre apparent de une fois et une fois un quart celui de la Lune, mêlaient leurs trajectoires aux longues bandes lumineuses et phosphorescentes des étoiles filantes. Au Brésil, au Labrador, au Groenland, en Allemagne, dans la Guyane française, on observa le même phénomène.

L'apparition du 12 au 13 novembre 1833 ne fut pas moins extraordinaire. « On aperçut les météores, dit Arago, le long de la côte orientale de l'Amérique, depuis le golfe du Mexique jusqu'à Halifax, de 9 heures du soir au lever du Soleil, et même, dans quelques endroits, en plein jour à 8 heures du matin. Les étoiles étaient si nombreuses, elles se montraient dans tant de régions du ciel à la fois, qu'en essayant de les compter, on ne pouvait guère espérer d'arriver qu'à de grossières approximations. L'observateur de Boston (M. Olmsted) les assimilait, au moment du maximum, à la moitié du nombre de flocons qu'on aperçoit dans l'air pendant une averse ordinaire de neige. Lorsque le phénomène se fut considérablement affaibli, il compta 650 étoiles en 15 minutes, quoiqu'il circonscrivît ses remarques à une zone qui n'était pas le dixième de l'horizon visible. Ce nombre, suivant lui, n'était que les deux tiers (?les trois quarts) du total; ainsi il aurait dû trouver 866, et pour tout l'hémisphère visible, 8660. Ce dernier chiffre donnerait par heure 34 640 étoiles. Or, le phénomène dura plus de 7 heures; donc le nombre de celles qui se montrèrent à Boston dépasse 240 000; car, on ne doit pas l'oublier, les bases de ce calcul furent recueillies à un moment où le phénomène était déjà notablement dans son déclin[1]. »

1. Les années suivantes, jusqu'en 1830, donnèrent encore lieu à l'observation de nombreuses étoiles filantes, dans cette même nuit du 12 au 13 novembre ou dans celle du 13 au 14, tant en Europe qu'en Amérique. L'apparition de 1838 a été signalée par sa coïncidence avec une aurore boréale, ce qui indique peut-être une liaison entre les deux ordres de phénomènes.

Nous verrons tout à l'heure des observations plus récentes confirmer la périodicité de l'averse du milieu de novembre, et, de plus, asseoir sur des bases positives une théorie nouvelle et originale qui relie les essaims d'étoiles filantes aux comètes et à certaines nébuleuses. En attendant, signalons les principales époques où les étoiles filantes ont coutume d'apparaître par masses plus ou moins nombreuses.

Vers le 2 janvier, a lieu une averse météorique dont les anciennes traditions paraissent avoir noté le souvenir, et qui a été observée : en Suisse, en 1835 et 1838; à Bossekop, en 1839, par M. Bravais pendant son expédition scientifique dans les régions polaires; et enfin en 1840, par M. Quételet en Belgique. Vers les 28-29 du même mois, a lieu un second flux d'étoiles filantes (1868). Il n'y en a aucun d'important en février, bien que les anciennes observations chinoises et les chroniques du moyen âge signalent plusieurs apparitions dans ce mois : il y a lieu de faire une remarque pareille pour le mois de mars. En avril, aux environs de la date du 20, essaim d'étoiles filantes, observées en masse, en 1803 en Virginie et dans le Massachussetts, en 1838 dans le Tennessee et en 1868 à Bergame. Les mois de mai et de juin sont, sous ce rapport, les moins remarquables de l'année : c'est à peine si l'on trouve trace, dans les anciennes chroniques, de quelques averses d'étoiles filantes, et les observations modernes sont muettes à cet égard. Le mois de juillet, notamment vers les derniers jours, est au contraire signalé par plusieurs pluies météoriques assez abondantes : ainsi les 28 et 29 juillet des années 1848 et 1849 ont donné un nombre extraordinaire d'étoiles filantes observées à Aix-la-Chapelle par M. Heis, à Bonn par M. Schmidt. Vient ensuite l'essaim du 10 août, dont le retour périodique est annoncé quinze jours d'avance par une recrudescence dans le nombre horaire des étoiles filantes de chaque nuit. Il faut aller ensuite jusqu'à la date des 18-20 octobre pour retrouver une

averse météorique nettement caractérisée. Enfin, après le flux si remarquable des nuits du 12 au 14 novembre, dont nous avons donné en détail les apparitions de 1799 et de 1833, et qui a reparu avec un éclat extraordinaire en 1866 et surtout en 1867, on ne trouve plus que les deux essaims de décembre, l'un du 6 au 7, l'autre du 9 au 13 de ce dernier mois de l'année. Notons, pour la date du 6 décembre, la grande averse météorique observée en 1798 par Brandes.

§ 3. ORIGINE COSMIQUE DES ÉTOILES FILANTES. THÉORIE DE SCHIAPARELLI.

Quelle que soit la nature physique des étoiles filantes, des bolides et des aérolithes ou mieux météorites — masses minérales qui, de temps à autre, tombent des hauteurs de l'atmosphère sur le sol — il est aujourd'hui prouvé que leur origine commune est *cosmique* ou extra-terrestre. En un mot, ce sont des corps qui circulent dans les régions interplanétaires et qui deviennent visibles, quand, venant à rencontrer la Terre le long de son orbite, ils pénètrent plus ou moins avant dans son atmosphère.

Cette origine avait été soupçonnée, même par les anciens. Mais c'est seulement depuis la fin du dernier siècle, que des observations précises ont permis d'appuyer sur des preuves positives une opinion d'abord toute conjecturale, et qui d'ailleurs était loin, il y a un siècle à peine, d'être partagée par les hommes de science. Pour la plupart d'entre ceux-ci, les étoiles filantes ou tombantes étaient des météores atmosphériques, prenant naissance, s'allumant et s'éteignant dans les hautes régions de l'air; elles s'y formaient par la réunion de matières inflammables, d'exhalaisons sorties du sol et que leur légèreté spécifique avait entraînées dans les hauteurs. Chladni (1794) paraît être le premier, dans les temps modernes, qui

ait considéré les bolides comme ayant une origine extra-terrestre. L'idée lui en avait été du reste suggérée, ainsi que Chladni le rapporte lui-même, par le physicien Lichtenberg, auquel il avait demandé son opinion sur la nature des météores ignés : « La meilleure manière d'expliquer ces phénomènes serait d'attribuer à ces météores une origine plutôt *cosmique* que *tellurique*, c'est-à-dire de supposer que c'était quelque chose d'étranger qui arrivait du dehors dans notre atmosphère, à peu près comme Sénèque avait bien expliqué la nature des comètes, qu'on a pourtant regardées, pendant beaucoup de siècles, comme des météores atmosphériques. » Les mémoires de Chladni, les travaux de deux jeunes étudiants allemands, Brandes et Benzenberg, puis ceux d'un grand nombre d'observateurs qui vinrent à leur suite, en Angleterre, en Allemagne, en France, en Belgique, et aux États-Unis, ont fini par donner à la théorie nouvelle une consécration définitive, en créant une nouvelle branche de l'astronomie physique. Passons rapidement en revue les preuves de l'origine cosmique des étoiles filantes.

C'est d'abord la grande hauteur à laquelle le point lumineux fait sa première apparition dans l'atmosphère, et la hauteur, considérable encore, à laquelle il disparaît aux yeux de l'observateur. Brandes et Benzenberg, en 1798, sont les premiers qui aient songé à déterminer la distance où se trouvent du sol les météores, quand ils s'enflamment et quand ils s'éteignent. Ayant choisi des stations suffisamment distantes, ils purent déterminer la parallaxe de quelques étoiles filantes dont diverses circonstances leur avaient permis de reconnaître l'identité. Ils en conclurent ainsi la hauteur de ces étoiles, principalement à l'instant de leur disparition, et ils trouvèrent qu'elle variait de 7 à 23 milles d'Allemagne, ou de 52 à 170 kilomètres. Deux étoiles filantes, dont les hauteurs initiales et finales furent également mesurées, avaient commencé à

paraître à des hauteurs de 118 et de 127 kilomètres, pour s'éteindre à 77 et à 85.

Depuis, de nombreuses recherches de ce genre ont été faites et ont confirmé l'exactitude de ces premières mesures. Ainsi, d'après Weiss, les étoiles filantes du 10 août commencent en moyenne à s'enflammer, quand elles parviennent à une distance verticale au-dessus du sol égale à $114^{k}.6$, et elles s'éteignent à une hauteur de $87^{k}.9$. Le professeur Newton a trouvé, pour les mêmes distances, $112^{k}.4$ et 90^{k}, et M. A. S. Herschel, un des plus assidus observateurs des météores, $118^{k}.4$ et $91^{k}.6$. La moyenne est, comme on voit, en nombres ronds, de 120 kilomètres pour la hauteur d'apparition, de 90 kilomètres pour celle de leur extinction. Ces nombres n'indiquent que les hauteurs moyennes, et certaines étoiles filantes s'enflamment à des distances beaucoup plus considérables encore. D'après le docteur E. Heis, l'une des étoiles filantes du 10 août 1866 est entrée dans l'atmosphère à une hauteur de 290 kilomètres et a disparu à 124 kilomètres. Les hauteurs initiale et finale d'une étoile, vue simultanément à Berlin et à Breslau, n'auraient pas été inférieures à 460 et à 310 kilomètres. Plusieurs étoiles filantes observées à la fois à Paris et à Orléans en 1855, par les astronomes de l'Observatoire, étaient égalememt à plus de cent lieues de hauteur. Il y aurait donc, sans parler des étoiles télescopiques, sans doute plus élevées encore, des étoiles filantes qui s'enflamment bien au delà des limites présumées de l'atmosphère[1] ?

1. Comme l'incandescence de ces corps ne semble pas pouvoir être attribuée à une autre cause qu'à la chaleur développée par la compression des particules atmosphériques, avec ou sans développement d'électricité, ou, si l'on veut, par la transformation de leur force vive, les faits qui précèdent tendent à prouver que l'atmosphère terrestre est beaucoup plus élevée qu'on ne le croyait, d'après les mesures crépusculaires : « La grande élévation des étoiles filantes, disait à ce sujet sir John Herschel, fait soupçonner une espèce d'atmosphère supérieure à l'atmosphère aérienne, plus légère et pour ainsi dire plus ignée. » (*Lettre à M. Quételet*, du 18 août 1863.)

Mais un élément d'une grande importance qui se déduit immédiatement de la hauteur des étoiles filantes, c'est la longueur réelle des trajectoires qu'elles parcourent sous les yeux des observateurs, depuis l'instant de leur apparition jusqu'à celui de leur extinction. Un calcul simple donne alors approximativement la vitesse avec laquelle le point lumineux a franchi cet arc : or, on a trouvé ainsi que certaines étoiles filantes se meuvent avec des vitesses qui atteignent jusqu'à 70 kilomètres par seconde, c'est-à-dire avec une rapidité qui atteint et même dépasse de beaucoup les vitesses planétaires. C'est là une preuve péremptoire de l'origine cosmique de ces corps, qui ne peuvent être considérés comme des météores proprement dits, puisque leur passage dans l'atmosphère de la Terre n'est qu'une circonstance fortuite pour ainsi dire, une des phases, la dernière peut-être, il est vrai, de leur existence indépendante et individuelle.

Arrivons maintenant à une autre preuve non moins décisive de leur origine extra-terrestre.

L'observation des pluies météoriques, notamment de celles d'août et de novembre, a bientôt mis en évidence un caractère fort remarquable des trajectoires des étoiles filantes appartenant à un même essaim : c'est une certaine communauté dans la direction de ces trajectoires. Tandis que les météores isolés semblent émerger de tous les points du ciel et suivent, dans leur route apparente, des lignes qui se coupent dans tous les sens, les étoiles filantes périodiques paraissent le plus souvent décrire sur la voûte céleste des droites ou courbes ayant un point de départ ou de rayonnement commun.

Dès 1799, Humboldt remarquait une direction commune dans les nombreux météores qui ont signalé la nuit du 13 novembre. En 1833, 1834, 1837, les observateurs notèrent la constellation du Lion, et spécialement la région environnant l'étoile Gamma, comme le point de départ des essaims du même mois. Au contraire, les étoiles filantes du 10 août ont

été reconnues, dès 1839, comme ayant pour point rayonnant commun l'étoile Algol de Persée, ou des régions très-voisines de cette étoile, entre Persée et le Taureau. Depuis, d'autres points de divergence ont été constatés, soit pour une partie des météores qui font leurs apparitions à ces deux époques, soit pour d'autres essaims. Mais un point capital, sur lequel

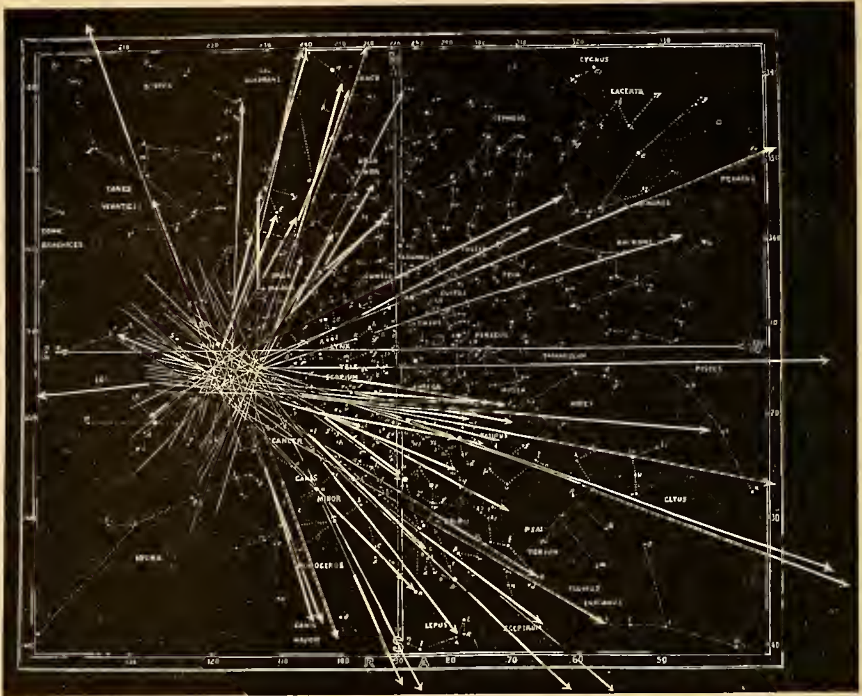


Fig. 226. Trajectoires des étoiles filantes observées à Greenwich dans la nuit du 13 au 14 novembre 1866. Radiant dans la constellation du Lion.

Olmstedt a insisté avec une grande raison, et que toutes les observations ultérieures ont confirmé, est celui-ci : Le point commun de radiation, d'où les étoiles paraissent émerger, ne change pas pendant toute la durée du phénomène, bien que le mouvement diurne entraîne ce point à des hauteurs diverses au-dessus de l'horizon. Ainsi, il est manifeste que les orbites des étoiles filantes sont complétement indépendantes

du mouvement de rotation de la Terre, ce qui revient à dire que l'origine des météores est cosmique et non pas atmosphérique, comme on se l'imaginait encore vers la fin du dernier siècle. C'est là un fait qui ne souffre aucune interprétation opposée, et qui prouve sans réplique qu'avant de pénétrer

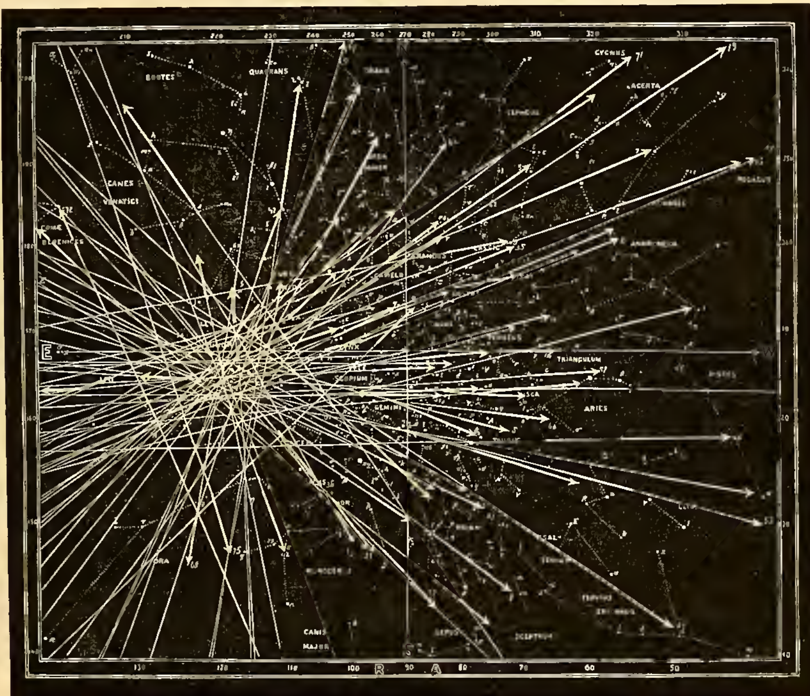


Fig. 227. Trajectoires de 83 étoiles filantes, observées à Glasgow, dans la nuit du 13 au 14 novembre 1866, par A. S. Herschel et H. Mac Gregor.

dans notre atmosphère, les étoiles filantes se mouvaient dans les espaces interplanétaires.

Un second point, qui ajoute à l'intérêt de l'observation précédente et en confirme la haute valeur, mais qui est particulier à certains essaims, a été non moins bien établi, dès 1834, par l'astronome Encke. Ce savant, basant ses calculs sur les observations du flux de novembre 1833, faites en Amérique, a fait voir que le point de radiation des météores était précisément celui vers lequel le mouvement de transla-

tion entraîne la Terre à l'époque du 13 novembre. La tangente à l'orbite terrestre va couper alors, en effet, le point de la constellation du Lion que nous avons signalé. L'essaim du 27 au 28 novembre se meut dans le même sens que la Terre, non à l'opposé comme le précédent. D'autres essaims enfin, par exemple ceux du 10 août et ceux du 20 avril, ne rencontrent pas la Terre de la même façon. Ils la *prennent de flanc* pour ainsi dire. Il résulte de là des degrés différents dans la vitesse de rencontre. Les Léonides, ou météores du 13 novembre, pénètrent dans l'atmosphère avec une vitesse égale à la somme de leur vitesse, qui est de 43 kilomètres environ, et de celle de la Terre, qui est de 29 kilomètres, c'est-à-dire en parcourant 72 kilomètres par seconde. C'est à peu près la vitesse maximum des chutes d'étoiles filantes. Les météores des 27-28 novembre ont une vitesse propre de 40 kil.; celle de la Terre étant de 29 kil., ils devraient parcourir 11 kil., mais l'attraction accroît cette vitesse et la porte à 19 kilomètres. Quant aux Perséides, ou étoiles filantes du 10 août, elles se meuvent à raison de 60 kil., et celles du 20 avril de 51 kilomètres par seconde.

Les conséquences à tirer de cette coïncidence ne sont pas douteuses. Les étoiles filantes de chaque essaim, qui paraissent diverger, suivent en réalité des routes parallèles, ou du moins à peu près parallèles : leur commune direction est, pour quelques essaims, celle de l'élément de l'orbite de la Terre, aux époques de chaque apparition; pour d'autres, une ligne plus ou moins inclinée sur l'écliptique; mais pour expliquer leur divergence apparente à tous, il suffit d'invoquer les lois de la perspective et de rappeler un fait d'observation que chacun peut aisément vérifier. Quand le vent est assez fort pour rendre sensible le mouvement des nuages qui couvrent le ciel, si l'observateur se tourne vers le point de l'horizon d'où vient le vent, il voit les nuées se mouvoir avec des directions en apparence différentes; en face de lui, elles semblent monter

et gagner progressivement le zénith; de chaque côté, au contraire, leurs mouvements affectent des directions de plus en plus inclinées avec la première, de sorte que le parallélisme réel se trouve transformé en une divergence apparente.

L'étude du rayonnement des essaims de météores mérite, comme on voit, toute l'attention des observateurs; aussi a-t-elle

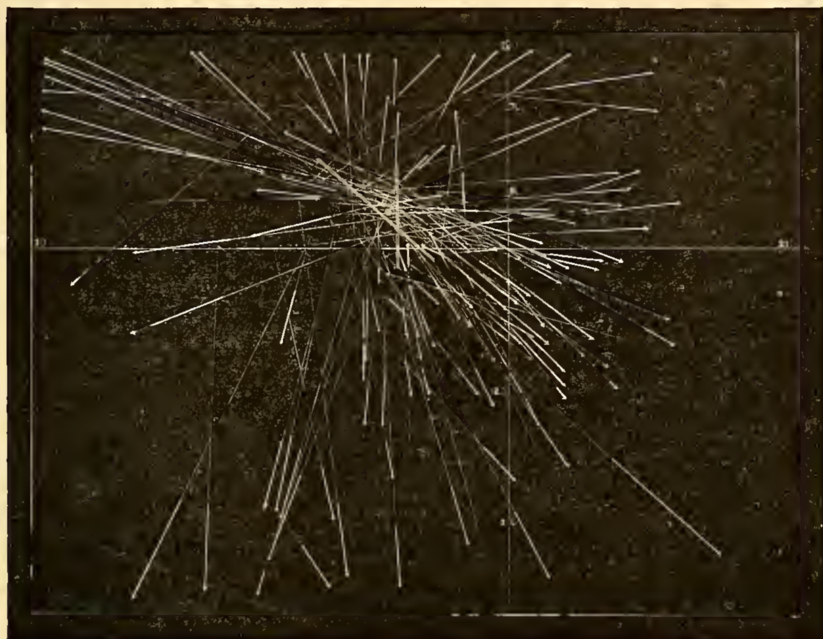


Fig. 228. Trajectoires des étoiles filantes d'août 1875, observées à Urbino par M. A. Serpieri.

été, depuis 1833, et est-elle surtout maintenant l'objet de leurs recherches assidues. C'est en étendant ces recherches aux étoiles filantes jusque-là considérées comme isolées ou sporadiques, qu'on a peu à peu reconnu qu'un grand nombre ont aussi des trajectoires qui rayonnent vers un point ou vers une région plus ou moins limitée du ciel. Ces points, qu'on nomme *points rayonnants*, ou simplements *radiants*, sont aujourd'hui très-nombreux. Nous donnons ici la position de ceux qui correspondent aux principaux essaims d'étoiles

filantes mentionnés plus haut. Nous y joignons plusieurs dessins qui prouvent aux yeux, avec la clarté de l'évidence, la réalité de la divergence des trajectoires des essaims auxquels ces trajectoires se rapportent[1].

ESSAIMS D'ÉTOILES FILANTES ou courants météoriques.	POSITIONS DES POINTS RAYONNANTS.			AUTORITÉS.
	Ascensions droites.	Décli-naisons.	Étoiles voisines.	
2 janvier	234°	51°	*C* Quadrant.	A. Herschel.
28 janvier	233	26	γ Cour. boréale.	Schiaparelli.
20 avril	277	34	α Lyre.	A. Herschel.
10 août	44	56	*K* Persée.	»
18-20 octobre	90	15	ν Orion.	»
25-26 octobre	98	25	ε Gémeaux.	Herrick.
13-15 novembre. . .	149	23	ϰ Lion.	Iwining.
11-13 décembre. . .	100	33	θ Gémeaux.	Greg.

Toutes ces lignes qui se croisent et s'entre-croisent (fig. 226 à 230) et, finalement, vont passer dans une région relativement resserrée du ciel, sont les lignes parcourues par les étoiles et projetées sur l'horizon du lieu de l'observation. Mais les quelques exceptions qu'on y remarque prouvent aussi que les étoiles filantes d'une même nuit n'appartiennent pas toujours au même essaim.

En résumé, la hauteur considérable à laquelle les étoiles filantes s'allument et s'éteignent aux confins de notre atmosphère, la vitesse énorme avec laquelle elles décrivent la portion de leurs trajectoires qui rend visible le filet de lumière et la traînée phosphorescente qu'elles laissent après leur dis-

1. Un catalogue général des points radiants des essaims, dû à M. Grey, ne comprend pas moins de 132 courants météoriques. D'autres savants, MM. Heis et Neumayer, Schmidt, Schiaparelli et Tupman, ont publié des catalogues du même genre, qui, joints à celui de Grey, forment un total de 695 points radiants. Il reste à savoir combien, dans ce nombre, appartiennent à des courants vraiment distincts.

parition, vitesse qui atteint et dépasse celles des planètes dans leurs orbites; enfin, la direction commune suivie par la majorité des météores d'un même essaim, qui se traduit par un rayonnement apparent à partir d'une même région de la voûte céleste; la périodicité du retour des essaims, d'où il résulte que la Terre, en revenant chaque année ou après un intervalle de plusieurs années aux mêmes points de son orbite, rencontre précisément les mêmes groupes de ces météores: tous ces faits constatés par les observations de trois quarts de siècle ne permettent plus de mettre en doute l'origine cosmique des étoiles filantes. Il est donc certain que des corps, ou mieux des corpuscules célestes, ne brillant pas d'ordinaire d'une lumière qui leur soit propre, voyagent en grand nombre, par bancs plus ou moins pressés, dans les espaces interplanétaires. Leurs mouvements affectent une grande régularité, puisque la Terre les rencontre à intervalles réguliers, dans les mêmes régions du ciel et dans des directions peu variables.

La question est maintenant de savoir si ces agglomérations de matière circulent autour du Soleil, comme les planètes dans des orbites elliptiques, ou comme les comètes dans des orbites beaucoup plus allongées, paraboliques ou même hyperboliques. En un mot, si les essaims sont des courants de matière météorique, quelle est la loi de leur circulation dans l'espace? quels sont les éléments de leurs orbites elles-mêmes? Et puis, question non moins intéressante, quelle est leur origine? On fit tout d'abord, pour répondre à ces questions, diverses hypothèses. On supposa que les essaims formaient des anneaux fermés plus ou moins elliptiques, plus ou moins excentriques par rapport au Soleil, centre de leurs mouvements, et par rapport à l'orbite de la Terre. On rendit ainsi, tant bien que mal, compte des faits, des observations. C'est ainsi qu'on attribuait les apparitions du 10 août et du 11 au 13 novembre, à la rencontre de la Terre avec un ou plusieurs anneaux de ce genre, qui eussent coupé le plan de son orbite

en deux régions correspondant aux positions qu'occupe notre planète à ces deux époques. Mais une étude plus complète des éléments des orbites de ces deux essaims n'a pas permis de s'arrêter à cette hypothèse.

C'est alors qu'un astronome italien, M. Schiaparelli, directeur de l'Observatoire de Brera (Milan), est venu, par des spéculations hardies, jeter une lumière nouvelle sur un point encore obscur de l'astronomie contemporaine. Il crut pouvoir déduire de diverses observations que la vitesse des météores,

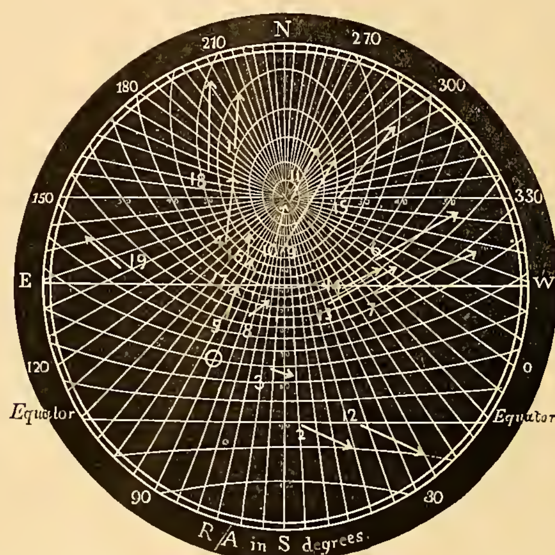


Fig. 229 Essaim météorique des étoiles filantes du 18 au 20 octobre, d'après A. S. Herschel. Radiant : étoile ν d'Orion.

au moment où ils pénètrent dans l'atmosphère terrestre, est au moins égale à ce que nous avons vu qu'on nomme la vitesse cométaire, par conséquent supérieure de près de moitié à la vitesse de translation de la Terre. Il montra que cette hypothèse rendait compte d'un fait[1], mis en évidence

1. Celui de la variation du nombre des étoiles filantes observées dans une nuit quelconque, avec l'heure de l'observation. Le nombre horaire maximum coïncide avec les heures qui suivent 2 ou 3 heures du matin.

par un des plus zélés observateurs de ces météores, notre compatriote Coulvier Gravier, fait qui paraissait d'abord en contradiction avec l'origine cosmique des étoiles filantes, tandis qu'il en est, au contraire, une éclatante confirmation. Pourvu de cet élément précieux, le savant italien put calculer les éléments des orbites de certains essaims, reconnaître qu'ils décrivent dans l'espace des courbes excessivement allongées, paraboliques ou hyperboliques.

Il restait à expliquer l'origine des essaims, à montrer la

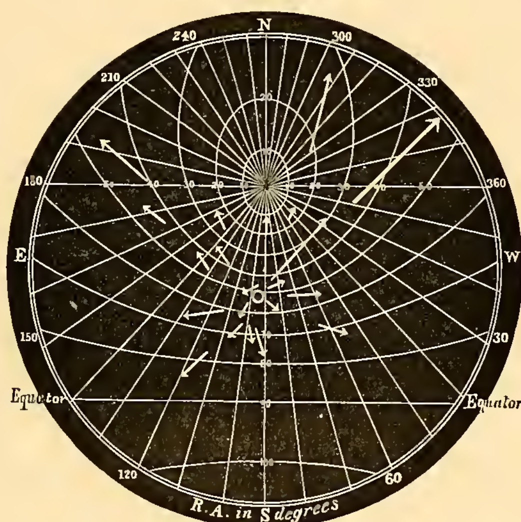


Fig. 230. Essaim météorique des étoiles filantes du 9 au 13 décembre, d'après A. S. Herschel. Radiant : étoile θ des Gémeaux.

raison de leur périodicité annuelle, des maxima qui apparaissent à des époques séparées par plusieurs années d'intervalle. Là, il fallait quitter un instant le domaine des faits, s'adresser aux spéculations théoriques.

Les essaims d'étoiles filantes paraissent constitués comme des agrégations de corpuscules assez distants les uns des autres. Mais si, au lieu de les voir à leur arrivée à la proximité de la Terre, au contact de son atmosphère, il était possible de les contempler à une distance un peu grande dans le ciel, l'en-

semble, qu'il soit éclairé par les rayons solaires, ou qu'il brille d'une lumière propre, paraîtrait à l'observateur comme un nuage, une nébulosité. Et comme la vitesse admise des essaims dans leurs orbites est la vitesse cométaire, il s'ensuit que les nébulosités dont nous parlons viennent des profondeurs de l'espace, de régions fort éloignées du Soleil et des planètes. Néanmoins il est clair que ces nébuleuses, qui viennent peut-être de quelque autre système sidéral, n'entrent dans le nôtre que sous l'influence de l'attraction, devenue à un certain instant prépondérante, de notre Soleil.

Ce sont des considérations de ce genre qui ont sans doute amené M. Schiaparelli à se poser ce problème : « Étant donnée une nébuleuse située à une distance fort grande, mais néanmoins telle que l'attraction du Soleil détermine son mouvement vers notre système, sous quelle forme cette agrégation de corpuscules isolés, supposée sphérique au point de départ, arrivera-t-elle à son périhélie? En résolvant ce problème par l'analyse et d'après les principes de la gravitation universelle, M. Schiaparelli prouve que la masse nébuleuse, de globulaire qu'elle était au point de départ, se sera peu à peu transformée de manière à être, lors de son passage dans le voisinage du Soleil, allongée en un immense courant continu de forme parabolique, incomparablement plus dense qu'à l'origine, et pouvant mettre des années, des centaines et même des milliers d'années à effectuer successivement son passage au périhélie.

On comprend dès lors que la Terre, venant à rencontrer ce courant en un point de son orbite, et passant à chacune de ses révolutions par ce même point de l'espace interplanétaire, il en résultera une apparition périodique de météores : ce seront les corpuscules du courant qui viendront traverser les hautes régions de l'atmosphère, y briller un instant chacun sous l'apparence d'une étoile filante, les uns consumés et détruits par cette combustion, les autres poursuivant leur

route, après avoir de la sorte pendant quelques secondes manifesté la présence de la nébuleuse dont ils font partie. Les longues traînées paraboliques expliquent ainsi les courants périodiques annuels des météores : selon que la portion traversée est plus ou moins profonde ou plus ou moins épaisse, le nombre des étoiles filantes se trouvera, à la date correspondante, plus ou moins considérable.

Quant aux périodes plus longues, qui donnent des maxima à

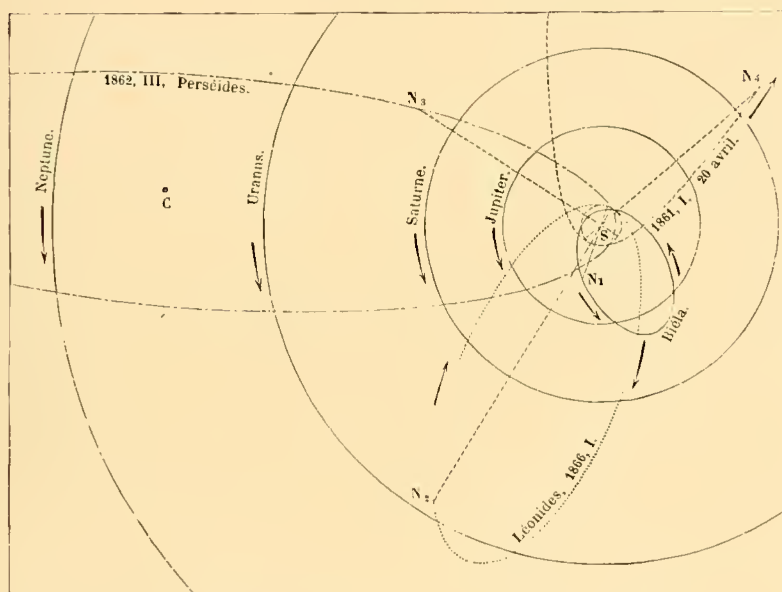


Fig. 231. Orbites des essaims de novembre, d'août et d'avril, et des comètes de 1862 III, de 1866 I et de 1861 I.

des intervalles réguliers de plusieurs années, M. Schiaparelli en rend compte de la façon suivante. De même que les longs courants paraboliques sont comparables, au point de vue de leurs mouvements, aux comètes à orbites infinies, de même les courants périodiques intermittents sont analogues aux comètes périodiques à retours réguliers. Des circonstances particulières, des perturbations planétaires par exemple, peuvent transformer un courant indéfini en un anneau elliptique

fermé. C'est probablement le cas, d'après Schiaparelli, des météores du 13 au 14 novembre.

Nous n'entrerons pas dans des détails plus longs sur cette théorie à tous égards remarquable. Mais nous devons insister sur l'analogie qui existe entre les courants de nébulosité qui donnent naissance aux essaims météoriques et les nébulosités cométaires. La vitesse de translation, l'inclinaison des plans des orbites à tous les degrés, les mouvements dans tous les sens, sont des éléments communs aux comètes et aux essaims de météores. Les comètes et les essaims ont-ils même origine? Une sanction, la plus essentielle, manquait à cette dernière hypothèse, celle donnée par l'observation, seule capable de démontrer par le fait l'identité des deux espèces de nébuleuses. Or cette sanction existe aujourd'hui et elle paraît assez évidente pour défier toute contradiction. M. Schiaparelli ayant en effet recueilli tous les éléments donnés par les observations de l'essaim météorique du 10 août, a pu en calculer l'orbite, comme s'il s'agissait d'un corps céleste, d'une comète. Or, en cherchant parmi les éléments paraboliques des comètes cataloguées, il fixa son attention sur ceux de la comète III de 1862, et reconnut la presque identité de ces éléments et de ceux de l'essaim[1]. Voici le tableau qui permet cette comparaison :

	Éléments de l'orbite de l'essaim du 10 août calculés par Schiaparelli.	Éléments de l'orbite de la comète de 1862 calculés par Oppolzer.
Passage par le nœud descendant. .	août 10.75	—
Passage au périhélie	juillet 23.62	août 22.9 1862
Longitude du périhélie.	343° 38′	344° 41′
Longitude du nœud	138° 16′	137° 27′
Inclinaison	64° 3′	66° 25′
Distance périhélie.	0.9643	0.9636
Direction du mouvement	*Rétrograde*	*Rétrograde*
Période de révolution	108 ans	113ans (Stämpfer)

1. « Une pareille étoile filante, dit M. Schiaparelli, ayant une révolution périodique d'un peu plus d'un siècle, est un phénomène capable de donner

Une similitude aussi complète ne semble point pouvoir résulter d'une coïncidence fortuite. Mais le savant astronome italien ne s'est pas borné là. Il a calculé de même les éléments de l'orbite de l'essaim de novembre[1], puis reconnu encore

de sérieuses inquiétudes. Oppolzer a calculé la distance minimum à laquelle la comète passe relativement à l'orbite de la Terre et l'a trouvée inférieure au diamètre de l'orbite lunaire. La Terre parcourt cet espace en un peu plus de 6 heures. Un pareil rapprochement, si la comète passait au nœud le 10 août un peu avant midi, pourrait aisément devenir une véritable traversée que la Terre ferait dans les parties les plus denses de la comète. »

Il serait en effet curieux d'être ainsi bombardé par des milliards d'étoiles filantes et de bolides. Comme la plupart s'éteignent à une très-grande hauteur, il n'y aurait que les morceaux de résistance qui parviendraient jusqu'au sol ; mais s'ils étaient très-nombreux, il pourrait y avoir quelque danger. En tout cas, en traversant les hautes régions de l'air, les étoiles filantes transforment leur force vive en chaleur, et la somme totale de chaleur ainsi communiquée à la Terre en un temps très-court, pourrait fort bien n'être pas sans influence sur la température des couches inférieures et du sol.

1. La périodicité de 33 à 34 ans de l'essaim de novembre avait été soupçonnée depuis longtemps, et même calculée avec une certaine rigueur, il y a quelques années. Olbers, après une étude approfondie des diverses apparitions de novembre qui établissent une incontestable périodicité annuelle, à jour fixe, crut voir dans les averses extraordinaires de 1799 et de 1833 l'indice probable d'une période plus étendue dont la durée serait, comme on voit, à peu près d'un tiers de siècle. Il partit de là pour prédire un nouveau maximum dans les nuits du 12 au 14 novembre 1867. Les observations de ces dernières années ont complétement confirmé les vues de ce savant professeur. En effet, le nombre horaire des étoiles filantes s'abaissa peu à peu à partir de 1833 ; en 1848, il n'était plus que de 110, et en 1858, que de 40 météores. Mais, peu à peu, il a repris une marche croissante, qui ne pouvait manquer d'attirer l'attention des astronomes. Le professeur Newton, du collége d'Yale (États-Unis), reprit à nouveau l'étude de la question de la périodicité prédite par Olbers, et il crut pouvoir annoncer, pour la nuit du 13 ou celle du 14 novembre 1866, un flux extraordinaire d'étoiles filantes, visible de presque tous les points de la Terre, et qui devait se produire probablement pour la dernière fois avec une aussi grande intensité dans le siècle actuel. Déjà, en 1865, le phénomène avait présenté un grand éclat : 280 météores par heure étaient notés à Greenwich de minuit à cinq heures du matin. On les vit seulement après minuit jusqu'au lever du Soleil, et c'est entre une heure et deux heures qu'ils parurent en plus grande abondance. Les observateurs étaient donc prévenus, et un grand nombre furent à leurs postes dans les deux nuits du 13 et du 14 novembre 1866.

La prédiction du professeur Newton s'accomplit, et les résultats confirmèrent pleinement ses calculs. En France, en Angleterre, en Italie, en Grèce,

leur presque identité avec les éléments elliptiques de la comète de Tempel (1866 I), éléments calculés par Oppolzer.

en Espagne, le phénomène apparut dans toute sa splendeur, dans la nuit du 13 au 14 (le temps généralement couvert, en Europe du moins, ne permit pas de faire des observations dans la nuit du 12 au 13). Les résultats les plus complets, au point de vue du nombre des météores observés, sont venus d'Angleterre, où les astronomes, stimulés par les prédictions d'Olbers et de Newton et par les notices du savant et laborieux observateur A. Herschel, avaient concentré toute leur attention et leurs efforts pour cette nuit. Voici, du reste, les nombres donnés par les astronomes de l'Observatoire de Greenwich ; les nombres prouvent, sans aucun doute, que si le phénomène ne s'est pas montré avec toute la magnificence des nuits de novembre aux dates célèbres de 1799 et de 1833, du moins il a atteint une intensité assez forte pour justifier la prédiction d'Olbers et les calculs de MM. Newton et Adams* :

Étoiles filantes observées à Greenwich dans la nuit du 13 au 14 novembre 1866.	de 9 à 10 heures.	10
	— 10 à 11 —	15
	— 11 à 12 —	168
	— 12 à 1 —	2032
	— 1 à 2 —	4860
	— 2 à 3 —	832
	— 3 à 4 —	528
	— 4 à 5 —	40
	Total des météores.	8485

Pour l'année 1867, on avait prévu que la rencontre de l'essaim de novembre par la Terre aurait lieu à un instant correspondant à une heure assez avancée de la matinée en Europe, et par conséquent ne serait guère visible qu'en Amérique. C'est ce que l'observation a confirmé. Les étoiles filantes, en effet, n'ont commencé à paraître un peu nombreuses, en France et en Italie, qu'après 5 ou 6 heures du matin, tandis qu'aux Antilles, aux États-Unis, les observateurs furent témoins d'une apparition splendide, consistant en myriades de météores, d'étoiles filantes mélangées de bolides aux cou-

* M. A. Newton, par une discussion approfondie des anciennes apparitions de novembre (dans les années 902, 931, 934, 1002, 1101, 1202, 1366, 1533, 1602 et 1698), avait établi dans un Mémoire publié par la revue *American Journal of Sciences and Arts*, qu'on pouvait en rendre compte en supposant que la matière météorique se meut dans des ellipses dont la période serait de 180 jours, de 185 j. 4, de 345 j. 6, de 376 j. 6, ou de 33 années 1/4. Il faisait remarquer que, pour se prononcer entre ces diverses orbites, il y aurait à calculer les perturbations que les diverses planètes doivent faire subir à leurs éléments. M. Adams, en étudiant la question à ce point de vue, a montré que la période de 33 ans 1/4 doit être considérée comme la plus probable.

Donnons également le tableau qui permettra une comparaison immédiate :

	Éléments elliptiques de l'orbite de l'essaim du 13 novembre d'après Schiaparelli.	Éléments elliptiques de l'orbite de la comète Tempel (1866 I) d'après Oppolzer.
Passage au périhélie.	novembre 10 092	janvier 11.160 1866
Longitude du périhélie . . .	56° 25′.9	60° 28′.0
Longitude du nœud	231° 28′.2	231° 26′.1
Inclinaison	17° 44′.5	17° 18′.1
Distance périhélie.	0.9873	0.9765
Excentricité	0.9046	0.9054
Demi-grand axe.	10.340	10.324
Période de révolution	33ans.250	33ans.176
Sens du mouvement.	*Rétrograde*	*Rétrograde*

Après avoir signalé cette nouvelle et importante coïncidence, l'auteur de la théorie faisait les observations suivantes : « Il est très-digne de remarque que les deux courants météoriques bien connus, ceux d'août et de novembre, aient chacun leur comète. Faut-il supposer que la même chose arrive pour tous les autres? Dans ce cas, on ne pourrait s'empêcher de voir dans ces fleuves cosmiques le résultat d'une dissolution de corps cométaires. Mais il serait au moins prématuré d'étendre cette conclusion à toutes les étoiles filantes; et il est possible que tous ces corps, grands et petits, forment dans l'espace des systèmes uniquement liés par leur attraction, et détruits ensuite par l'action du Soleil. Peut-être aussi ce que nous appelons comète n'est pas un corps unique, mais un ensemble de corps très-nombreux et très-petits attachés à un noyau principal. »

leurs les plus variées. La grande majorité avait encore la constellation du Lion pour point rayonnant.

Enfin, en 1868, à la même date, c'est-à-dire dans la nuit du 13 au 14 novembre, le phénomène s'est encore montré très-brillant au sud de l'Europe, au cap de Bonne-Espérance et en Australie, sans atteindre toutefois l'éclat qu'il présentait deux ans auparavant; on ne s'attendait pas à cette recrudescence, qui prouve que l'arc de l'orbite sur lequel, d'après la théorie de Schiaparelli, il existe une condensation de météores, est beaucoup plus étendu qu'on ne l'avait d'abord supposé.

On voit tout de suite quel lien existe entre ces vues et celles d'après lesquelles M. Hœk a étudié ce qu'il nomme les systèmes cométaires : on saisit de même le rapport entre cette manière d'envisager la constitution des comètes et les faits d'observation que nous avons signalés dans les paragraphes consacrés plus haut au dédoublement de la comète de Biéla, aux divisions et dislocations d'anciennes comètes, phénomènes transmis par les traditions, mais jusqu'à présent reconnus ou regardés comme des fables par les astronomes.

Pour terminer ce chapitre qui laisse un domaine si vaste ouvert à la fois aux recherches nouvelles et aux conjectures, n'oublions pas de mentionner un troisième et un quatrième cas d'identité entre les essaims météoriques et les comètes. Le premier concerne les météores du 20 avril. D'après MM. Gall et Weiss, l'orbite de cet essaim a les mêmes éléments que l'orbite de la comète 1861 I. Voici les éléments comparés de ces deux orbites :

	Météores du 20 avril.	Comète I 1861.
Longitude du périhélie.	236°	243°
Longitude du nœud	30°	30°
Inclinaison.	89°	80°
Distance périhélie	0.9550	0.9204
Excentricité.	0.9828	0.9835
Demi-grand axe	55.72	55.72
Durée de la révolution.	415 ans	415 ans
Sens du mouvement.	*direct*	*direct*

D'Arrest et Weiss ont pareillement assimilé la comète de Biéla et les étoiles filantes des premiers jours de décembre. Enfin, il paraît probable que la pluie si remarquable d'étoiles filantes qui a signalé la nuit du 27 novembre 1872[1] est due à

1. Cette averse météorique a été des plus brillantes. De nombreux observateurs ont pu recueillir, en Europe et en Amérique, les détails les plus circonstanciés sur cet intéressant phénomène, qui a été vu dans toute sa



llemin. del — F. Méreux

LA PLUIE D'ÉTOILES FILANTES

27 Novembre 1872

la rencontre qu'a faite la Terre, sinon de l'une des deux comètes, fragments de celle de Biéla, du moins d'un courant de matière qui a primitivement appartenu à cette comète

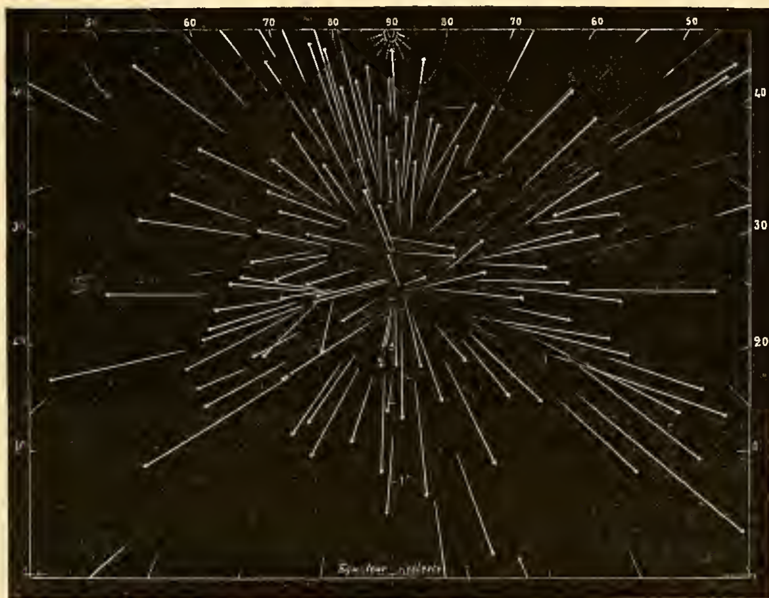


Fig. 232. Étoiles filantes du 27 novembre 1872, observées à Moncalieri, par Denza. Point rayonnant dans le voisinage de γ d'Andromède.

et qui, dans l'espace, suit à peu de chose près la même route.

Si ces hypothèses deviennent un jour des faits d'une authen-

beauté, depuis le midi de la France jusqu'en Grèce, mais surtout en Italie, à Mondovi, à Moncalieri, à Naples, à Messine, etc. La relation publiée par M. Denza donne 33 400 météores, observés et comptés à Moncalieri dans un intervalle de six heures et demie; mais ce savant fait remarquer que les étoiles filantes étaient si nombreuses que c'est à peine si l'on pouvait compter le quart ou le cinquième du nombre de celles qui se montraient en réalité. Au moment du maximum, entre sept et huit heures du soir, on en compta 400 en *une seule minute*, et pendant cette seule heure, 11 000 furent notées. Il évalue le nombre total à 160 000 environ. D'un point voisin du zénith s'échappaient silencieuses, des étoiles aux couleurs variées, blanches, azurées, rouges, bleues ou verdâtres. La plupart n'avaient que de courtes trajectoires qu'elles parcouraient lentement.

ticité reconnue, on pourra dire que parmi les comètes, ces nébuleuses qui errent d'étoile en étoile, il en est qui vont de temps à autre se ranger sous les lois d'un système solaire et accroître le nombre des astres qui le composent ; puis quelques-unes d'entre elles, se dissolvant à la longue sous l'action perturbatrice des planètes qu'elles rencontrent, accroissent peu à peu la masse de ces derniers corps : c'est ainsi que les immenses cétacés absorbent et dévorent par myriades les poissons ou autres petits êtres, qui pullulent dans l'Océan comme les essaims de météores dans les régions interplanétaires.

Voilà donc, si ces vues, qui auraient paru si étranges il y a seulement un demi-siècle, sont confirmées, un moyen nouveau bien inattendu de nous trouver en communication directe avec les comètes, puisque la Terre, chaque année, chaque nuit de l'année, rencontre sur sa route les fragments de nébulosités qui ont été des comètes. La constitution physique des astres se trouverait de la sorte éclairée d'un nouveau jour : on pourrait considérer comme très-probable la structure granulaire, c'est-à-dire formée de corpuscules isolés, des noyaux de comètes, structure que soupçonnait Babinet en s'appuyant sur des considérations d'un tout autre genre.

§ 4. ÉTUDE DE LA CONSTITUTION PHYSIQUE DES ÉTOILES FILANTES.

Une question d'un haut intérêt se pose maintenant.

Quelle est la constitution physique ou chimique des étoiles filantes? Sont-elles des masses gazeuses, liquides ou solides? Entre-t-il dans leur composition d'autres corps simples que les corps aujourd'hui connus, qui forment notre propre planète?

En répondant à ces questions, on aurait des données, d'autant plus précieuses qu'elles seraient plus positives, sur la matière qui circule dans les espaces célestes, sur les comètes elles-mêmes; bien plus, comme l'a fait remarquer Humboldt, nous nous trouverions ainsi directement en rapport avec le ciel dont la population ne nous est en majorité accessible que par la vue, c'est-à-dire par les sensations que déterminent dans nos organes les ondulations de l'éther émanées des divers corps célestes.

Mais on a vu que les étoiles filantes n'apparaissent que dans les plus hautes régions de l'atmosphère, qu'elles s'éteignent et sans doute s'évaporent bien avant d'arriver jusqu'au sol. Une seule méthode, l'analyse spectrale, pourrait donc nous renseigner sur leur état physique et chimique, du moins au moment de leur combustion. En étudiant de cette façon la lumière des étoiles filantes des 9 et 10 août 1866, A. Herschel a trouvé que les traînées et quelques noyaux d'étoiles étaient formés d'une substance gazeuse en ignition, renfermant notamment de la vapeur de sodium. La présence du sodium dans l'atmosphère à cette hauteur n'étant pas probable, A. Herschel en conclut que ce corps simple appartenait bien aux étoiles filantes analysées. D'autres spectres ont indiqué pour la constitution des météores, des agglomérations de parcelles solides incandescentes. En novembre 1868, le P. Secchi a analysé la lumière d'une étoile très-vive, dont la traînée était restée visible pendant un quart d'heure : son spectre, formé de raies et de bandes brillantes, rouges, jaunes, vertes, bleues, indiquait un gaz lumineux. M. Konkoly a étudié au spectroscope, en juillet et en août 1872, les traînées de trois météores; leurs spectres renfermaient toutes les raies du sodium et l'un d'eux avait en outre une ligne du magnésium. Un brillant météore du 13 octobre 1873, analysé par le même observateur, outre des raies du magnésium et du sodium, avait quatre lignes communes avec le spectre d'un

carbure d'hydrogène (*coal-gas*). Enfin, en 1874, M. Arcimis a observé, à Cadix, 50 étoiles du groupe des Perséides; 27 avaient un spectre continu où le violet faisait généralement défaut; presque toutes avaient la raie du sodium. En rapprochant ces résultats de ceux qu'a donnés l'analyse des spectres de la lumière des comètes, on y trouve un témoignage de plus en faveur de la théorie qui attribue à ces divers corps une même origine. Plus tard, on arrivera sans doute à des conclusions plus certaines.

Un mot, avant de terminer ce paragraphe, sur les bolides,



Fig. 233. Bolides du 14 novembre 1868. 1. Noyau blanc, plus brillant que Vénus. Double traînée bleuâtre. 2. Autre traînée, d'après Gilman.

que nous avons vus mêlés aux étoiles filantes dans les pluies de météores. Les bolides diffèrent-ils réellement des étoiles filantes? ou bien, ne sont-ce que les mêmes corps de dimensions réelles plus considérables? Ordinairement, les bolides se présentent avec des diamètres apparents assez gros pour être approximativement évalués. Aussi leur apparition a-t-elle lieu quelquefois en plein jour. Humboldt rapporte qu'un de ses amis fut témoin en 1788, à Popayan, de l'apparition d'un bolide, dont la lumière était si brillante, que la chambre où l'observateur se trouvait fut tout entière illuminée, bien qu'à ce moment le Soleil ne fût caché par

aucun nuage. Dans plusieurs relations d'apparitions de bolides que nous avons sous les yeux, les témoins comparent le disque du météore à celui de la Lune pour la grosseur : il y a eu sans doute, dans bien des cas, une exagération due à l'impression très-vive que cause une lumière éclatante, surtout quand le phénomène est inattendu.

Les bolides laissent presque toujours des traînées phosphorescentes, ou des nuages plus ou moins lumineux, qui persistent quelquefois très-longtemps après la disparition du météore. C'est ainsi que l'amiral Krusenstern a vu un bolide



Fig. 234. Double traînée vaporeuse, blanc-verdâtre. Météore du 14 novembre 1868, observé par Gilman.

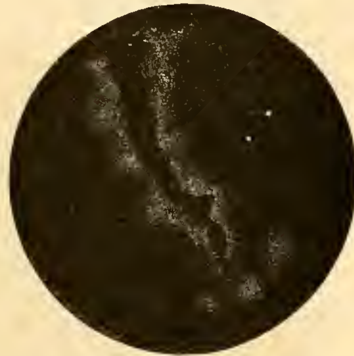


Fig. 235. Traînée d'un bolide du 14 novembre 1868. Nuage ovale au point de disparition du météore.

dont la traînée resta visible, sous forme d'un petit nuage, pendant une heure entière. Comme les étoiles filantes, les bolides affectent les couleurs les plus variées. Dans la nuit du 14 novembre 1868, le P. Secchi en a vu un dont le noyau a présenté successivement toutes les couleurs de l'arc-en-ciel : sa traînée est restée suspendue dans l'air comme une immense goutte, rouge en bas, irisée dans tout le reste de son étendue. La succession de couleurs remarquée dans ce bolide indique sans doute les phases diverses par lesquelles passe le phénomène de combustion, ou encore la variété de composition chimique des substances formant le météore. La même remarque peut sans doute s'appliquer aux étoiles filantes de

couleurs variées qui appartiennent soit à une même apparition ou à un même essaim, soit à des essaims différents. Sur les 50 météores observés en août 1874 par M. Arcimis et cités plus haut, 36 étaient de couleur blanche, 10 verdâtres, 1 bleu, 3 de couleur incertaine. En 1869, les météores de la même époque avaient une couleur rouge-violacée ou verdâtre ; en 1868, un observateur, M. Lowe, les trouvait tous bleus, d'un bleu intense ; un autre, M. Griffith, sur 41 météores, en notait 27 blancs, 3 bleus, 2 rouges. D'où viennent ces variations de couleur dans les météores d'un même essaim ? Serait-ce que les diverses parties du courant météo-



Fig. 236. Bolide quadruple observé par Tacchini, le 27 juillet 1874.

rique, en même temps qu'elles diffèrent sous le rapport de la densité, diffèrent aussi sous le rapport de la constitution chimique des matériaux dont elles sont composées ?

Peut-être, les bolides ne diffèrent des étoiles filantes que par leur volume et leur état physique, celles-ci étant de petites masses qui se réduisent entièrement à l'état gazeux par leur rapide passage et leur déflagration dans l'atmosphère : les bolides, tout en appartenant au même essaim, seraient des masses solides, beaucoup plus volumineuses, dont la superficie seule devient incandescente, qui pénètrent plus avant dans l'atmosphère, et, éprouvant une résistance croissante, voient diminuer leur vitesse. Alors,

l'attraction du globe terrestre devenant prépondérante, ces masses sont précipitées à la surface du sol, souvent après avoir fait explosion en nombreux fragments. Les météorites ou pierres tombées du ciel seraient, s'il en est ainsi, identiques avec les bolides, qui eux-mêmes ne différeraient pas essentiellement des étoiles filantes. Tous ces corps auraient



Fig. 237. Météore observé aux États-Unis, le 14 novembre 1868. Transformation de la traînée dans un intervalle de 14 minutes.

ainsi une même origine[1]. Mais avant de se prononcer sur une telle identité, il importe de connaître les circonstances qui

1. Les corpuscules composant les traînées de météores rencontrées par la Terre sont certainement troublés dans leur marche, par l'attraction de la masse de notre planète, d'une manière très-inégale, selon leurs distances, leurs vitesses et leurs masses propres. On conçoit même que quelques-uns d'entre eux deviennent alors des satellites de la Terre, décrivant autour d'elle des orbites plus ou moins excentriques et finissant, à la longue, par tomber à la surface. Cette hypothèse pourrait expliquer les apparitions isolées de bolides, et leur chute sur le sol; mais elle ne peut s'appliquer à tous les bolides, comme le prouve l'exemple singulier que nous allons citer.

Il résulte en effet des calculs de M. A. Tissot, répétiteur à l'École polytechnique, qu'un bolide, observé le 5 septembre 1868, en divers points de la France et de l'Italie, se mouvait avec une vitesse considérable (79 kilomètres par seconde) dans une orbite hyperbolique, ayant le Soleil pour foyer. On verra plus loin d'autres exemples de telles vitesses.

accompagnent les chutes de météores, phénomène beaucoup plus rare que celui de l'apparition des étoiles filantes et des bolides.

§ 5. LES MÉTÉORITES.

Pendant longtemps on a regardé comme fabuleux le fait de la chute, à la surface du sol, de corps provenant des espaces célestes. Les anciennes traditions, les histoires de l'antiquité et du moyen âge, les croyances populaires avaient beau parler de *pierres tombées du ciel;* les hommes de science n'en voulaient rien croire. Ou bien ils niaient le fait lui-même, ou ils l'interprétaient tout autrement, regardant les corps tombés sur la Terre comme lancés par des éruptions volcaniques, enlevés au sol par des trombes, ou encore produits par certaines condensations de matières au sein de l'atmosphère.

Mais cette incrédulité presque générale des savants céda, lorsque Biot lut à l'Académie des sciences son rapport sur la chute mémorable qui eut lieu à Laigle, dans le département de l'Orne, le 26 avril 1803. Le savant académicien, à la suite d'une enquête minutieuse faite sur les lieux, dut, en effet, constater la parfaite exactitude des circonstances relatives à un ordre de phénomènes que jusque-là niaient absolument la plupart des hommes de science. A la date qu'on vient de lire, voici ce qu'avaient vu de nombreux témoins : quelques minutes après l'apparition d'un grand bolide, se mouvant du sud-est au nord-ouest, et qu'on aperçut à Alençon, à Caen et à Falaise, une explosion effroyable, suivie de détonations pareilles au bruit du canon et d'un feu de mousqueterie, partit d'un nuage noir isolé dans le ciel très-pur. Un grand nombre de pierres météoriques furent précipitées à la surface du sol, où on les ramassa encore fumantes, sur une étendue de terrain qui ne mesurait pas moins de 11 kilomètres, dans le sens de sa plus grande longueur.



F. Meheux, Chromolith. Imp. Fraillery Paris

EXPLOSION DU BOLIDE DE QUENNGOUCK

le 27 Décembre 1857

d'après un Dessin du Lieutenant AILESBURY

La plus grosse de ces pierres pesait moins de 10 kilogrammes.

Depuis, de nombreuses chutes ont été non moins authentiquement constatées; les anciens récits ont été remis au jour, les chroniques européennes et chinoises compulsées, et l'on possède une histoire fort intéressante de ces phénomènes, d'un si haut intérêt pour la science[1].

Les circonstances qui accompagnent les chutes de météores



Fig. 238. Explosion d'un bolide à traînée serpentante. Observation du 11 novembre 1869, d'après un dessin de M. Joseph Silbermann.

et dont on possède un grand nombre de descriptions, dues aux témoins oculaires, sont naturellement très-variées dans

1. On compte une trentaine de chutes antérieures à l'ère vulgaire; 163 chutes entre le commencement de cette ère et l'année 1803, et 174 depuis que Biot fit son célèbre rapport : en tout 366 chutes. Quelques-unes dans ce nombre sont douteuses; mais en revanche, le nombre des observations va croissant rapidement depuis que l'attention des savants et du public est éveillée. Plusieurs collections ont été fondées pour recueillir et étudier les échantillons des météorites. Celle du Muséum d'histoire naturelle à Paris s'enrichit tous les jours sous la savante et zélée direction de M. Daubrée. En 1868, elle renfermait des échantillons de 203 chutes, et le poids total de ces précieux témoins des espaces cosmiques ne s'élevait pas à moins de 1681 kilogrammes. Le Musée de Vienne (Autriche), le British Museum à Londres possèdent aussi des collections importantes de météorites.

leurs détails secondaires ; mais leurs caractères principaux offrent une telle similitude qu'on peut les résumer dans une description générale.

Le premier de ces caractères est l'apparition d'une vive lumière, en tout semblable à celle des bolides. On voit apparaître un globe lumineux, d'une grosseur et d'un éclat souvent considérables, illuminant toute l'atmosphère, s'il paraît la nuit, assez intense s'il survient dans le jour, pour être visible



Fig. 239. Météore observé à Hurworth (comté de Durham) en octobre 1854.

même en plein midi. La couleur en est variée, comme celle des étoiles filantes, et souvent elle passe d'une teinte à l'autre pendant la durée de l'apparition.

Après avoir décrit une trajectoire que l'éclat de sa lumière permet aisément de reconnaître, et dont la direction est souvent presque horizontale, le bolide éclate, se divise en fragments plus petits qui se projettent dans toutes les directions. C'est à la suite de cette explosion, le plus souvent plusieurs

minutes après, qu'on entend un bruit comparable soit à celui du tonnerre, soit aux détonations du canon ou de la mousqueterie. Très-fréquemment, on aperçoit dans les régions de l'atmosphère qu'a traversées le météore, une traînée vaporeuse, ou un nuage, comme nous l'avons vu plus haut en parlant des bolides. Il est probable, en effet, qu'il n'y a pas de différence essentielle entre les bolides qui font explosion et ceux dont nous parlons maintenant; ou plutôt, la seule différence consiste en ce que les débris du corps qui s'est brisé dans les hautes régions ne sont pas toujours retrouvés à la surface du sol. Mais, dans le cas où l'observateur se trouve dans le voisinage des points où les fragments sont projetés, outre le bruit de la détonation, il entend un sifflement produit par le mouvement rapide des projectiles dans l'air, analogue au son strident des bombes, lorsqu'elles passent en tournoyant au-dessus de nos têtes; Abel Rémusat dit que les « Chinois comparent ce sifflement au bruissement des ailes des oies sauvages, ou encore à celui d'une étoffe qu'on déchire. »

On a cherché si les chutes de météores suivaient certaines lois de fréquence, selon les temps et les lieux. Arago, en groupant 206 observations selon les mois où les chutes ont eu lieu, a trouvé une répartition qui n'indique guère de périodicité. M. Stanislas Meunier a fait, de 102 chutes de météorites, une répartition semblable qui paraîtrait indiquer un maximum en juin et un autre en novembre, et deux minima, l'un en janvier, l'autre en juillet. Mais le nombre des observations est trop restreint pour qu'on puisse regarder ces résultats comme des lois réelles. Il en est de même, si l'on groupe les chutes d'après l'heure de la journée ou de la nuit. Sur 126 observations, 86 (d'après Haidinger) sont arrivées entre 6 heures du matin et 6 heures du soir, 40 seulement entre 6 heures du soir et 6 heures du matin. « Sur 72 météorites dont la chute nous est entièrement con-

nue, dit Al. Herschel, le plus grand nombre 58 sont tombées *après midi*, de midi à 9 heures du soir. » Sur les 126 d'Haidinger, 66 sont tombées entre midi et 9 heures du soir : ce n'est guère plus de la moitié. Enfin 53 sont tombées de

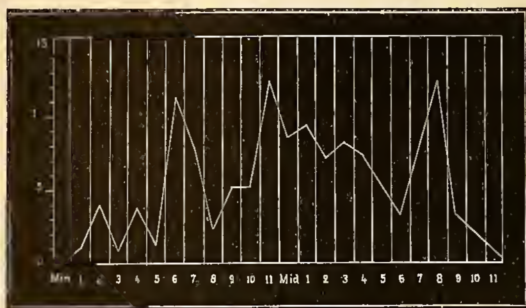


Fig. 240. Courbe représentant la distribution horaire, diurne et nocturne, des chutes de météorites.

minuit à midi, 73 de midi à minuit. Mais qui ne voit que la prédominance des chutes de jour peut provenir de ce que de pareils phénomènes ont naturellement plus de témoins dans

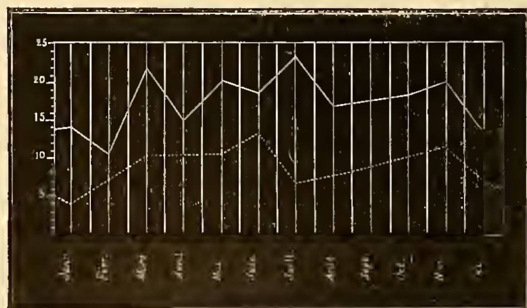


Fig. 241. Courbe mensuelle des chutes de météorites.
1. D'après Arago. 2. D'après Stanislas Meunier.

la journée qu'aux heures nocturnes ? Quant à la distribution selon les lieux, elle a suggéré des remarques assez singulières sur certaines régions qui, sous ce rapport, semblent plus favorisées que d'autres : telles sont la France méridionale, le nord de l'Italie, l'Inde anglaise.

Les preuves de l'origine cosmique des météorites sont d'abord celles invoquées pour les étoiles filantes; la vitesse considérable avec laquelle elles parcourent leur trajectoire au sein de l'atmosphère, puis la grande hauteur des points où apparaissent les météores et même où ils font explosion. En ce qui regarde le premier point, la vitesse des bolides qui précèdent la chute est comparable aux vitesses planétaires. La météorite d'Orgueil a pénétré dans notre atmosphère avec une vitesse de 20 kilomètres par seconde. On a mesuré de plus grandes vitesses encore[1].

Quant à la hauteur des bolides d'où proviennent les météorites, elle est souvent énorme. On a évalué à 100 kilomètres la hauteur verticale de celle d'Orgueil, à l'instant où elle est passée au-dessus de Nérac, et à 25 ou 30 kilomètres la hauteur du point où elle a fait explosion. Il n'est donc pas douteux qu'on ait affaire à des corps provenant des espaces célestes; les uns pénètrent dans l'atmosphère, s'y enflamment et tombent tout entiers sur le sol; les autres, après des explosions partielles et des chutes de quelques fragments matériels, continuent leur trajet dans l'atmosphère, et en sortent comme ils y étaient entrés, n'ayant subi, outre une perte insignifiante de matière, qu'une forte perturbation dans leur mouvement[2].

1. Il faut faire là, comme le remarque fort justement M. Daubrée, une distinction essentielle. « La vitesse énorme, dit-il, propre au corps lumineux ou bolide que l'on voit fendre l'atmosphère, contraste avec celle, incomparablement plus faible, que possèdent les éclats, au moment de leur arrivée sur la Terre. Le bolide se comporte comme un corps *lancé* avec une vitesse initiale considérable; au contraire, les éclats qui nous parviennent à la suite de la détonation paraissent, en général, ne posséder qu'une vitesse comparable à celle qui correspondrait à leur *chute*, ralentie d'ailleurs par la résistance de l'air. » (*Études récentes sur les météorites.*)

2. Prenons encore pour exemple le bolide du 14 mai 1864, ou la météorite d'Orgueil. Ce bolide avait, avant l'explosion, d'après toutes les relations, des dimensions apparentes considérables, à peu près égales à celles du disque lunaire dans son plein. En tenant compte de la hauteur calculée, M. Laussedat évalue son diamètre réel à 400 ou 500 mètres; la moyenne 450 mètres

Mais outre ces preuves d'ordre mathématique de l'origine extra-terrestre des météorites, il y a des témoignages d'une autre nature. Ce sont ceux qui ont surgi de la comparaison

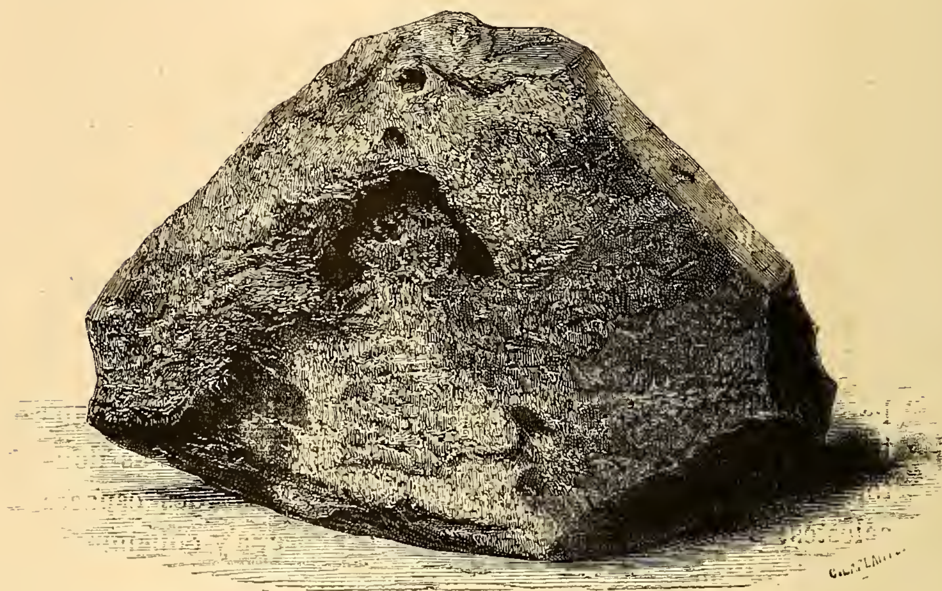


Fig. 242. Masse de fer météorique trouvée en 1828, par Brard, à Caille (Alpes-Maritimes). Groupe des Holosidères.

chimique et minéralogique des matériaux dont elles sont formées avec les roches des diverses couches du sol de notre

suppose un volume d'au moins 47 millions de mètres cubes, bien près de 100 millions de kilogrammes. Même en supposant ces évaluations exagérées (un corps très-lumineux paraît toujours plus gros qu'il n'est réellement), on voit que les quelques fragments recueillis, pesant à peine quelques kilogrammes, n'étaient qu'une fort petite partie de la masse totale. L'un des observateurs du phénomène dit nettement qu'après l'explosion, le bolide presque éteint, ayant repris une teinte rougeâtre, continua sa route et resta visible sur un arc encore assez étendu.

Un grand nombre de chutes n'ont donné qu'un seul fragment, une seule masse (qui ait été recueillie du moins). La chute d'Orgueil a fourni une centaine de morceaux, répartis en une soixantaine de points, sur un espace de 20 kil. de longueur. Les deux chutes les plus remarquables, à ce point de vue, sont celles de Knyahinya (1867), d'un millier de pierres, celles de l'Aigle (1803), où 3000 pierres se sont trouvées rassemblées dans un espace ovale

globe. Avant d'entrer dans quelques détails relatifs à cette composition, disons un mot de l'incandescence des bolides avant et pendant l'explosion. Il paraît évident que cette incandes-



Fig. 243. Fer de Pallas, trouvé en 1776, à Krasnojarsk (Sibérie). Groupe des Syssidères.

cence est causée par le trajet rapide du corps dans l'atmosphère, par la chaleur que développe la soudaine compression de l'air due à ce mouvement[1]. La température est

dont le grand axe avait 12 kilomètres, enfin celle de Pultusk (1868) qui n'était guère moins abondante que celle de l'Aigle.

Le poids des fragments varie entre quelques grammes et quelques kilogrammes. Le plus gros échantillon de la chute d'Orgueil atteignait 2 kilogr., de l'Aigle 9 kilogr. On cite quelques rares météorites pesant 2 ou 300 kilogr. On s'est demandé si l'augmentation de la masse de la Terre résultant de la chute continue des météorites n'entrait pas pour une part qui ne serait point insensible, dans la cause de l'accélération séculaire du mouvement de la Lune. C'est une question pour la solution de laquelle les données manquent encore.

1. M. Regnault, dans son remarquable *Mémoire sur la détente des gaz*, dit : « Les bolides traversent notre atmosphère avec une extrême vitesse; ils s'échauffent ainsi jusqu'à devenir incandescents, jusqu'à fondre complète-

assez intense pour fondre et vitrifier la surface des météorites qui, à peu d'exceptions près, sont recouvertes d'une sorte de vernis noirâtre d'un millimètre à peine d'épaisseur. Les fragments sont brûlants quand on les ramasse, mais cette température élevée est toute superficielle, et, lors d'une chute arrivée dans l'Inde, on a constaté que l'intérieur des masses météoriques était à une température très-basse.

Les résultats fournis par de très-nombreuses analyses de la composition chimique des météorites montrent que ces corps ne présentent aucun élément simple étranger à la Terre. On y a reconnu jusqu'à présent vingt-deux corps simples, que M. Daubrée range ainsi d'après l'ordre décroissant de leur importance :

Le *fer*, qui est absolument constant, tant à l'état de métal qu'à l'état de sulfure, et qu'on trouve en outre à l'état oxydé dans les masses pierreuses ; le *magnésium*, à l'état de silicate, quelquefois de phosphure ; le *silicium;* l'*oxygène*, dans la partie pierreuse des météorites ; le *nickel*, principal compagnon du fer ; le *cobalt;* le *chrome;* le *manganèse;* le *titane*, plus rare que les précédents ; l'*étain*, le *cuivre;* l'*aluminium*, le *potassium*, le *sodium* et le *calcium* qui existent dans certaines météorites à l'état de silicates multiples ; l'*arsenic*, le *phosphore;* l'*azote* qu'on a trouvé dans la météorite char-

ment, ou seulement à leur surface. On attribue encore ce fait à la friction contre les molécules gazeuses. Je crois que dans les deux cas le dégagement de chaleur provient d'une autre cause, et qu'il est dû uniquement *à la chaleur dégagée par la compression de l'air.* » (C. R. 1869, II.) Benzenberg avait émis la même opinion, en comparant l'incandescence des bolides aux effets du briquet à air. D'après M. Haidinger, la résistance que dut éprouver le bolide du 14 mars 1861 de la part de l'air n'aurait pas été inférieure à une pression de 22 atmosphères. M. Delaunay, en analysant les effets mécaniques et calorifiques de cette compression et de la réaction qui en est la conséquence, explique à la fois l'intensité de la détonation et la faible vitesse relative des fragments qui arrivent à la surface de la Terre comme des corps tombant d'une grande hauteur, la réaction s'opérant contre eux en sens inverse du mouvement qui animait la masse totale avant l'explosion.

bonneuse d'Alais; le *soufre*, le *chlore*, le *carbone* et enfin l'*hydrogène*.

Quant aux combinaisons que ces éléments forment entre eux, et qui existent également dans les roches terrestres, ce sont, entre autres, le péridot, le pyroxène, le feldspath anorthite, le fer chromé, la pyrite magnétique, le fer oxydulé.

Malgré la diversité de composition, soit chimique, soit minéralogique des météorites recueillies et étudiées jusqu'ici, elles ont pu être classées en types distincts. D'abord, le plus grand nombre est caractérisé par la présence du fer à l'état métallique; on ne connaît qu'un petit nombre de météorites où ce métal n'a pu être trouvé, si ce n'est à l'état de combinaison. De là deux grandes divisions reconnues et nommées par notre savant compatriote, M. Daubrée : la première comprend les SIDÉRITES où le fer existe à l'état métallique; la seconde, celle où il n'existe point : ce sont les ASIDÉRITES. Au reste, la première classe renferme divers groupes qu'on peut résumer dans le tableau suivant :

SIDÉRITES

Météorites renfermant du fer à l'état métallique.

I. *Holosidères*, ne contenant pas de matières pierreuses.

II. *Syssidères*, contenant à la fois du fer et des matières pierreuses; et où le fer se présente sous forme d'*une masse continue*.

III. *Sporadosidères*, contenant à la fois du fer et des matières précieuses, mais où le fer se présente en grains disséminés. Ce groupe se divise lui-même en trois sous-groupes : les *polysidères*, où la quantité de fer est considérable, les *oligosidères* où elle est faible, et les *cryptosidères* où le fer n'est pas discernable à la vue simple.

ASIDÉRITES

Météorites ne renfermant pas de fer à l'état métallique.

IV. *Asidères*, seul groupe de cette division.

Nous reproduisons ici des échantillons de chacun de ces groupes.

Le premier (fig. 242) est un bloc de fer pur, qui ne pèse

pas moins de 625 kilogrammes; il a été trouvé dans une plaine du département du Var, faisant aujourd'hui partie des Alpes-Maritimes. Il est fort remarquable par sa texture cris-



Fig. 244. Fragment du fer de Pallas.

talline, visible même sur ses couches superficielles, mais rendue plus apparente encore par une section faite artificiellement à l'un de ses angles. C'est une des richesses des galeries

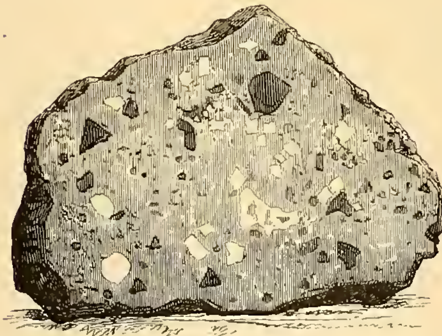


Fig. 245. Météorite de la Sierra de Chaco (Sporadosidère).



Fig. 246. Fragment de la météorite charbonneuse d'Orgueil (Asidère).

minéralogiques du Muséum d'histoire naturelle de Paris, qui, grâce au zèle de M. Daubrée, voit s'accroître chaque jour le nombre des météorites recueillies en divers points du globe. Le second (fig. 243) est célèbre dans les annales de la science sous le nom de *fer de Pallas*. Il a été trouvé en

1776 à Krasnojarsk en Sibérie, et pesait 700 kilogrammes. Le dessin de la figure 244 reproduit un échantillon fragmentaire du Muséum d'histoire naturelle, qui montre la structure curieuse de ce fer, sorte d'éponge métallique, dont les vides sont remplis de péridot. Le fragment de météorite de la Sierra de Chaco, reproduit dans la figure 245, appartient au groupe des *Sporadosidères* et pèse 12 kilogrammes; c'est une météorite du sous-groupe des polysidères, tandis que celle de Juvinas (fig. 247) est dans les cryptosidères. La quatrième météorite ici représentée (fig. 246) est un des rares échantillons du groupe des asidères. C'est un fragment de 1130 grammes de la météorite charbonneuse d'Orgueil. Enfin, notre dernier dessin (fig. 248) est un bloc de fer météorique découvert il y a six ans par M. Nordenskiöld, à Ovifak, localité de l'île de Disco (Groenland). C'est certainement la plus volumineuse des masses de ce genre; elle ne pèse pas moins de 20 000 kilogrammes. D'après M. Nordenskiöld, M. Wöhler et M. Daubrée, qui ont fait l'analyse chimique et minéralogique de ce bloc et des fragments de roches trouvés en grand nombre dans le voisinage, bien que différant à certains égards des météorites connues (elles renferment du carbone, de l'azote, comme les météorites charbonneuses), ces masses de fer natif se séparent d'une manière encore plus tranchée des roches terrestres; de sorte que leur origine cosmique paraît probable aux savants que nous venons de citer. Il reste des doutes cependant à ce sujet. (Voy. les notes de M. Daubrée, dans les *Comptes rendus*, juin et juillet 1872.)

Le Muséum d'histoire naturelle de Paris renferme un moulage de cette météorite remarquable.

Il nous reste, pour terminer ce court résumé des connaissances actuelles sur une branche fort curieuse de l'astronomie, à donner un aperçu des hypothèses qu'on a faites pour expliquer les chutes de météorites à la surface de notre globe. Il

faut répéter d'abord ce que nous avons déjà dit des premières et fausses idées qu'on se faisait du phénomène, il y a un siècle à peine. Les pierres qui tombent du ciel ne sont pas des *pierres de tonnerre*, comme le croyaient encore en 1769 les académiciens qui, en rendant compte de la chute de Lucé, attribuaient la formation de tels corps à l'électricité atmosphérique. Ce ne sont pas non plus des déjections volcaniques, ni des débris de roches enlevés du sommet des montagnes, puis projetés sur le sol par une action mécanique des ouragans ou des

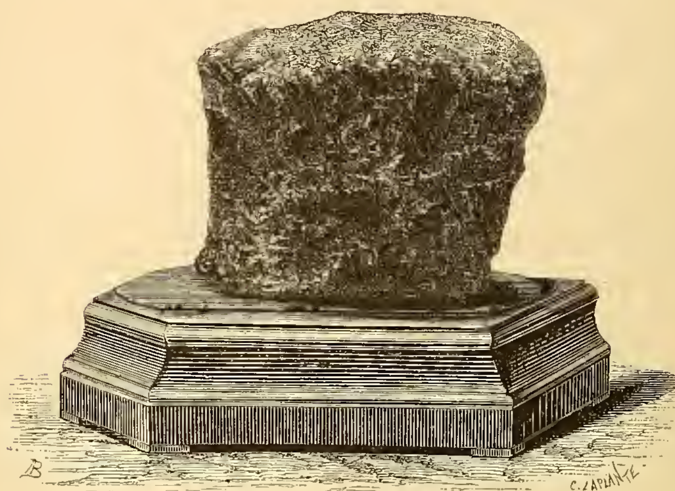


Fig. 247. Météorite tombée à Juvinas (Ardèche), le 15 juin 1821.
Bloc de 42 kil. du groupe des sporadosidère-scryptosidères.

trombes, ainsi que le croyaient de savants et libres esprits, Fréret, Gassendi, Muschenbrock, Deluc; ni des concrétions de substances au sein de l'atmosphère, selon la conjecture de Descartes. Toutes ces hypothèses tombent devant la constatation d'un seul fait : celui de la vitesse planétaire des météorites, vitesse qui dépasse énormément celle qu'aurait un corps quelconque précipité à la surface du globe terrestre, sous l'influence seule de la pesanteur.

En admettant l'origine cosmique ou extérieure à la Terre des météorites, on a essayé d'en trouver l'explication dans la

projection de roches envoyées de la Lune et sorties de ses cratères en éruption. Laplace, Biot, Poisson ont calculé la vitesse avec laquelle de telles masses devraient être lancées des volcans lunaires, pour qu'elles pussent atteindre et dépasser la sphère d'attraction de notre satellite, et de là, sous l'influence de la gravité terrestre, venir tomber sur le sol. Cette vitesse n'aurait rien d'extraordinaire, surtout étant

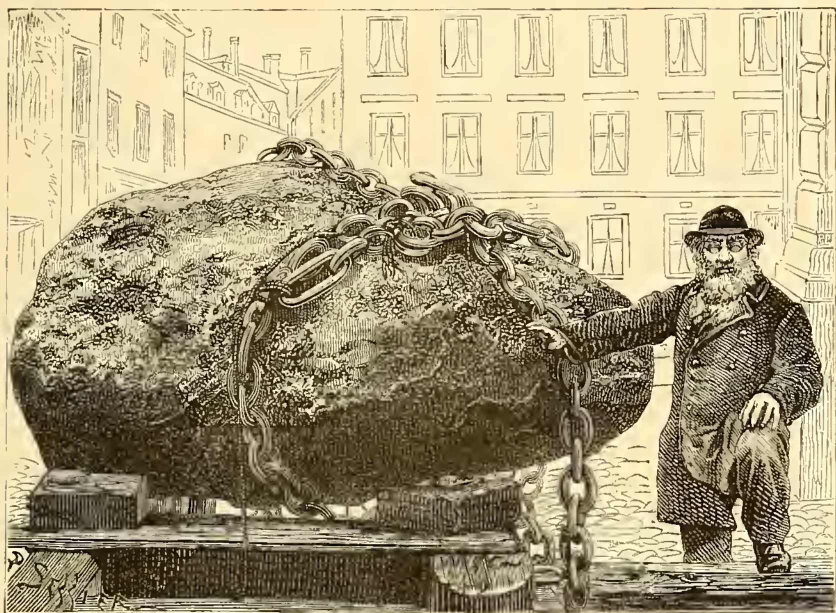


Fig. 248. Bloc de fer météorique découvert à Ovifak, en 1870, par M. Nordenskiöld.

donnée la faible intensité de la pesanteur à la surface de la Lune, ainsi que l'absence d'une atmosphère résistante : elle ne dépasserait point 2500 mètres par seconde. Mais l'objection décisive, au moins pour la plupart sinon la totalité des météorites observées, est toujours l'énorme vitesse avec laquelle elles ont pénétré dans notre atmosphère. Il paraît donc plus probable que, comme les étoiles filantes, les météorites sont des corps qui se meuvent indépendamment dans les espaces planétaires, soit en circulant dans des orbites fermées autour

du Soleil, soit en se mouvant dans des orbites paraboliques ou hyperboliques, et dans ce cas nous arrivant des espaces intersidéraux. Un de nos jeunes et savants géologues, M. Stanislas Meunier, y voit les débris d'un ancien satellite de la Terre, ou d'un corps planétaire qui s'est fendu et désagrégé dans la suite des âges, comme feront un jour nécessairement, selon lui, les planètes refroidies et desséchées. C'est sur l'étude approfondie des météorites des divers groupes et leur comparaison avec les roches des couches profondes du globe, c'est aussi sur l'état actuel du globe lunaire, dont les fentes et rainures indiquent la vétusté et sont comme le prodrôme d'une prochaine ruine, que M. S. Meunier fonde cette théorie à coup sûr originale, mais sur le mérite de laquelle notre incompétence ne nous permet pas de nous prononcer[1].

Comme Humboldt l'a dit éloquemment, les chutes de météorites nous mettent en relation directe, immédiate, avec la matière des autres corps célestes avec lesquels la Terre n'a d'autre communication que celle des vibrations calorifiques et lumineuses, ou encore la mystérieuse force de la gravitation. « Accoutumés que nous sommes, dit-il, à ne connaître les êtres placés hors de notre globe que par la voie des mesures, du calcul et du raisonnement, nous nous étonnons de pouvoir maintenant les toucher, les peser, les analyser. » Cette satisfaction de l'esprit n'est pas la seule qu'on ait su tirer de l'étude de ces corps. Non-seulement ils ont fourni une preuve nouvelle de l'unité de composition des astres au point de vue chimique, démontrée aussi par l'analyse spectrale ; mais les minéralogistes et les géologues ont tiré de leur étude des rapprochements du plus haut intérêt qui jettent un certain jour sur le mode de formation des couches du globe terrestre

1. Nous renvoyons le lecteur aux publications de M. Meunier, où cette thèse est soutenue : *Étude descriptive, théorique et expérimentale des météorites* (1867). *Le Ciel géologique* (1871) et divers articles parus en 1873 dans le journal *la Nature* sous ce titre : *les Pierres qui tombent du ciel.*

lui-même. L'analogie de composition des météorites avec les roches des régions profondes, surtout avec les roches magnésiennes du type péridot, ont conduit M. Daubrée à considérer en quelque sorte le péridot comme la scorie universelle; d'où la conclusion que « l'oxygène, si essentielle à la nature organique, aurait aussi joué un rôle important dans la formation des corps planétaires. » Les météorites, ajoute-t-il, sont des produits certainement formés sous l'action d'une forte chaleur et confirment ainsi plus positivement encore l'universalité de l'origine par voie ignée des corps cosmiques, eussent-ils, comme la Terre, perdu leur éclat et une partie de leur haute température originelle. » Il faut ajouter, avec le savant académicien, une remarque importante : c'est que, si certaines météorites, comme les météorites charbonneuses, ont offert les éléments des corps organisés, l'azote, le carbone, cependant on n'y a rien encore trouvé « qui ressemble aux matériaux constitutifs des terrains stratifiés : ni roches arénacées, ni roches fossilifères, c'est-à-dire rien qui rappelle l'action d'un océan sur ces corps, non plus que la présence de la vie. »

Au point où nous sommes parvenus de la description du ciel, n'ayant pas encore dépassé les limites du monde solaire, des réflexions générales sur la constitution de l'Univers paraîtront peut-être prématurées. Cependant, il n'est peut-être pas inutile de jeter un regard en arrière sur le chemin parcouru, de chercher à embrasser dans leur ensemble les corps célestes déjà décrits, et les phénomènes variés que leurs mouvements présentent aux yeux de l'observateur terrestre. Une telle revue rétrospective, outre qu'elle nous permettra de poser un jalon sur l'immense route ou nous voyageons guidés par les admirables travaux des astronomes anciens et modernes, va peut-être nous fournir un lien entre ce monde où nous vivons, *in quo movemur, vivimus et sumus*, et les plages lointaines de l'univers sidéral.

Ce lien, qu'on ne soupçonnait guère il y a vingt ans, ce sont les corps célestes étudiés dans ce troisième livre : comètes, étoiles filantes et météorites, qui en ont fait pressentir l'existence; et les lecteurs de cet ouvrage ont déjà pu s'en faire une idée dans les chapitres qui précèdent, en parcourant les passages relatifs à l'origine des comètes et à leur connexion avec les étoiles filantes, d'après les vues de MM. Hoek et Schiaparelli. Ces vues ne doivent point sans doute être considérées comme des vérités mathématiquement démontrées, mais leur degré de probabilité dépasse de beaucoup celui de pures hypothèses, et chaque jour des observations nouvelles tendent à changer une telle probabilité en certitude. Il ne peut donc qu'être avantageux d'en compléter l'exposé.

La matière existe dans l'espace à différents degrés de division, ou de condensation, qu'on peut, selon M. Schiaparelli, ranger en quatre classes. Dans les deux premières sont les étoiles isolées, comme le Soleil, ou groupées, comme celles que nous étudierons bientôt. La troisième classe comprend des corps où la matière déjà divisée en faibles masses, et peu condensée, ne devient visible qu'en approchant du Soleil : ce sont les comètes. Enfin, la quatrième et dernière classe, composée des corps où la matière offre le degré de division le plus grand, comprend les nuages cosmiques, agglomérations de particules matérielles, dont les constituants ne dépassent généralement pas en grosseur les corps que nous pouvons porter et manier à la surface de la Terre. Les espaces interstellaires sont incessamment parcourus par de telles agglomérations, dont les mouvements, comparables à ceux des étoiles, sont dus probablement aux mêmes causes.

Qu'il s'agisse des comètes ou des nuages cosmiques, une même influence, celle de l'attraction de la masse du Soleil, détermine leur entrée dans notre système, quand ils s'approchent assez près de notre corps central pour que son action devienne prépondérante. Alors ils décrivent autour du foyer

commun des orbites généralement paraboliques, plus rarement hyperboliques, et qui ne deviennent des ellipses, que grâce à la rencontre de quelque planète et aux perturbations qui en sont la conséquence.

La pénétration d'un nuage cosmique au sein du monde solaire a pour résultat la transformation du nuage, quelles qu'en soient d'ailleurs la forme et l'étendue primitives, en un courant parabolique, assez allongé pour mettre des années, des siècles, des milliers d'années même à achever son passage au périhélie. Parmi de tels courants de météores, ceux-là seuls qui rencontrent la Terre dans sa révolution annuelle, nous donnent le spectacle des flux d'étoiles filantes, parce qu'alors la rapidité de leur passage au sein de l'atmosphère détermine leur incandescence momentanée. Le nombre des essaims météoriques déjà connus peut donner une idée de la multitude des courants semblables qui sillonnent les espaces interplanétaires. A la longue, ils doivent graduellement changer de forme, semblables aux rivières qui, lentement, changent leurs lits; la gravitation des corps célestes où la matière plus condensée forme des masses incomparablement plus grandes, agit sur eux pour les dissoudre, les rompre en fragments tout en modifiant leurs orbites : de telles transformations se sont déjà manifestées dans le courant météorique qui produit le flux des étoiles filantes du milieu de novembre.

La connexion reconnue entre certaines comètes et quelques essaims météoriques, montre assez la commune origine de ces deux classes de corps, et une même distinction doit être faite à l'égard de leurs mouvements qui tantôt ont lieu dans des orbites paraboliques, tantôt se font dans des orbites fermées ou elliptiques. Dans le premier cas, les comètes ne se montrent qu'une fois, lors de leur passage au périhélie, tandis que les courants fort allongés de météores mettant des cycles d'années à passer par ce point, donnent lieu à des apparitions annuelles. Quant aux courants qui parcourent des orbites

elliptiques, outre la périodicité annuelle, ils sont soumis généralement à des périodicités plus étendues, parce que la matière inégalement distribuée sur leur pourtour forme en certains points des amas plus denses, dont la rencontre avec la Terre coïncide avec les flux de météores les plus abondants. C'est ainsi que s'expliquent les maxima du flux de novembre qui reviennent, comme la comète correspondante, après des intervalles périodiques de 33 années et un quart. D'ailleurs, il existe probablement des courants discontinus de corpuscules météoriques, consistant en groupes irrégulièrement distribués le long de l'orbite commune; ils donnent lieu à des apparitions irrégulières d'étoiles filantes, espacées par des intervalles inégaux, mais offrant toujours ce même caractère de revenir à peu de chose aux mêmes dates annuelles, par la raison fort simple que leur orbite coupe toujours l'orbite terrestre à peu près au même point; l'invariabilité relative de leurs points radiants en est un témoignage.

Enfin de grandes averses isolées, dont le retour est inconnu et peut-être ne se reproduira point, s'expliquent par le passage d'un nuage cosmique récemment introduit du dehors dans notre système, où il fait sa première apparition.

Reste un dernier point à élucider, qui va nous ramener à la question de l'origine des nuages météoriques et des comètes.

On a vu qu'il n'y a pas lieu de distinguer entre les étoiles filantes et les bolides lesquels ne sont que des étoiles filantes d'une grosseur, apparente ou réelle, plus considérable que les autres. Mais une pareille identité doit-elle s'appliquer aussi aux météorites, c'est-à-dire aux corpuscules cosmiques qui sont réellement tombés à la surface du sol ? M. Schiaparelli, dans un mémoire du plus haut intérêt[1], a comparé les météorites et les étoiles filantes sous tous les rapports

1. *Sulla relatione fra le comete, le stelle cadenti ed i meteoriti;* Milano, 1871.

possibles de différence ou de ressemblance : mode d'apparition, éclat lumineux, explosion, détonation, variations diurnes ou annuelles, masses, vitesses et trajectoires, etc. La conclusion de ce minutieux et savant examen est que la plupart des différences signalées entre les deux classes de corps ne prouvent rien contre leur identité. On peut passer de l'une à l'autre de ces classes considérées dans leurs extrêmes, par des gradations insensibles. Mais il n'en est pas de même sous le rapport de leurs mouvements. Tandis que la vitesse de pénétration des étoiles filantes dans l'atmosphère est de l'ordre des vitesses planétaires, au plus cométaires, plusieurs météorites avaient une vitesse indiquant des orbites hyperboliques[1]. Ainsi les météorites seraient des corps étrangers à notre monde solaire, distincts des comètes et des essaims de météores. De plus, leur origine stellaire ne peut se concilier avec la supposition que les diverses météorites jusqu'ici recueillies dérivent d'un corps unique. Il faut donc admettre que les espaces qui environnent les étoiles sont peuplés d'une quantité de petits corps à l'état fragmentaire, se mouvant dans toutes les directions ; et comme la composition chimique et minéralogique des météorites est identique à celle des corps terrestres, que l'analyse spectrale a révélé une pareille similitude dans tous les astres étudiés jusqu'ici, on en arrive forcément à la conséquence, déjà signalée plus haut, de l'unité de composition de tous les corps de l'Univers.

1. Outre le bolide dont l'orbite a été calculée par M. Tissot, cité dans la note de la page 629, M. Schiaparelli signale la météorite de Pultusk (30 janvier 1868) qui, à son entrée dans l'atmosphère, avait une vitesse de 54 kilomètres par seconde ; le bolide tombé en Hollande le 4 mars 1863, dont la vitesse était double de celle de la Terre ; celui calculé par Petit, du 9 octobre 1857 ; enfin trois autres météorites dont la chute a eu lieu en Amérique les 2 et 6 août 1860, et le 15 novembre 1859. Les orbites de ces corps étaient toutes hyperboliques ; celle du bolide du 4 mars avait une excentricité égale à 8.74, de sorte que ce corps a dû traverser le système solaire presque en ligne droite.

IV

LA LUMIÈRE ZODIACALE

§ 1. ÉPOQUES DE VISIBILITÉ. INCLINAISON ET ÉTENDUE. REFLET.

Dans les soirées des mois de février, de mars et d'avril, et surtout dans celles voisines de l'équinoxe du printemps, alors que dans nos climats le crépuscule est de courte durée, si l'on examine l'horizon vers l'ouest, un peu après le coucher du Soleil, on aperçoit une large lueur qui s'élève en forme de cône à travers les constellations étoilées. La même apparence est visible le matin, à l'Orient, avant le lever du Soleil, pendant les mois de septembre et d'octobre, c'est-à-dire aux environs de l'équinoxe d'automne. C'est cette lueur que les astronomes appellent la *Lumière zodiacale*. Les spectateurs non prévenus, ou peu familiers avec l'aspect ordinaire du ciel, pourraient la confondre soit avec une portion de la Voie Lactée, soit avec des restes de la lumière crépusculaire, soit encore avec une aurore boréale. Mais, avec un peu d'attention, il est impossible de se tromper et de s'y méprendre. La forme triangulaire ou conique du fuseau lumineux, son élévation et sa position inclinée sur l'horizon en font un phénomène à part et qui mérite une mention particulière.

Il y a deux siècles à peine que la lumière zodiacale est connue des astronomes, et c'est D. Cassini qui l'a le premier, sinon

découverte[1], du moins sérieusement décrite et observée. Dès l'origine des observations, on chercha naturellement à expliquer le phénomène ; mais avant de mentionner les théories proposées, il importe de décrire les circonstances de son apparition.

Parlons d'abord des époques de sa visibilité.

Dans nos climats, les époques les plus favorables sont, comme nous venons de le dire, celles qui avoisinent les équinoxes, en mars et en octobre. Mais, à la vérité, la lumière zodiacale est visible dans la zone tempérée, dans tous les mois de l'année, tantôt le soir, tantôt le matin, tantôt successivement le matin et le soir d'un même jour. Les longs crépuscules, la présence de la Lune sur l'horizon, le manque de sérénité du ciel sont évidemment des obstacles à cette visibilité, mais non toutefois d'une façon absolue. Ce qui le prouve, c'est le tableau suivant, donnant la répartition mensuelle de

1. Dans un fort intéressant Mémoire intitulé *Découverte de la lumière céleste qui paraît dans le Zodiaque*, Cassini cite lui-même l'observation antérieure d'un écrivain anglais, Childrey, qui avait vu le phénomène une vingtaine d'années plus tôt, vers 1659 ou 1660. Humboldt, dans son *Cosmos*, cite une observation plus ancienne, qui se rapporte probablement à la lumière zodiacale, et qu'il trouva mentionnée dans un manuscrit des anciens Aztèques. « Il est impossible, dit-il, de ne pas reconnaître la lumière zodiacale dans la brillante lueur que l'on vit en 1509, pendant quarante nuits consécutives, monter comme une pyramide au-dessus de l'horizon oriental du plateau mexicain. » Les anciens paraissent ne l'avoir point connue. D. Cassini l'observa depuis le 18 mars 1683, jour où il la vit pour la première fois, jusqu'en janvier 1693. Fatio de Duilier, de 1684 à 1686, Kirch et Eimmart, de 1688 à 1694, puis Mairan vers 1733, l'étudièrent également ; mais c'est à Fatio qu'on doit la première observation de la lumière zodiacale du matin, le 7 octobre 1684. En janvier et février 1685, Cassini vit la lumière zodiacale à la fois le soir d'un jour et le matin du jour suivant. Chose singulière, depuis Mairan on ne s'occupa plus guère du phénomène qu'au point de vue théorique, et les observations devinrent rares et peu suivies. Parmi les astronomes contemporains qui ont rappelé l'attention sur la lumière zodiacale par des travaux de longue haleine, il faut citer avant tous le docteur Heis, de Munster, qui en a fait une observation suivie pendant vingt-neuf années, de 1847 à 1875, puis le Rév. G. Jones, qui a publié un ouvrage considérable sur ce sujet : *Observations on the zodiacal light from april, 2, 1853, to april, 22, 1855*. Nous donnons plus loin un aperçu de ces remarquables recherches.

418 observations faites en Europe, principalement par le docteur E. Heis de Münster, dans une période de vingt-neuf années, de 1847 à 1875 :

Janvier	58	Juillet	4
Février	71	Août	12
Mars	81	Septembre	23
Avril	58	Octobre	28
Mai	10	Novembre	19
Juin	5	Décembre	48

La figure 249 rend sensibles à l'œil ces résultats et révèle l'existence de deux maxima de visibilité, pour les mois de mars

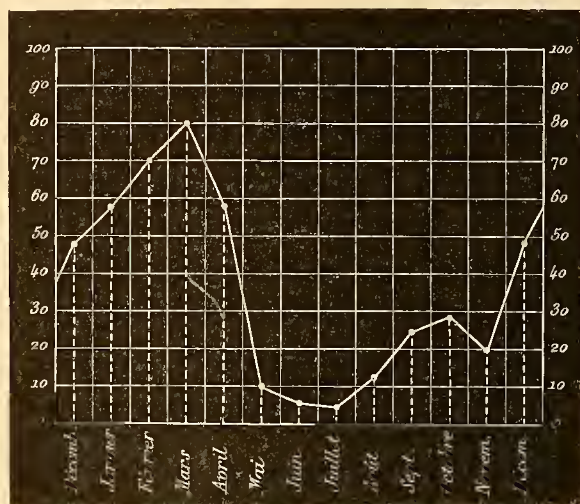


Fig. 249. Courbe de visibilité de la lumière zodiacale, d'après les observations de M. E. Heis.

et d'octobre, et de deux minima, le principal en juin ou juillet, le second en novembre.

A mesure qu'on s'approche de l'équateur ou mieux des tropiques, non-seulement la lumière zodiacale est plus aisément observable à toutes les époques de l'année, mais aussi elle acquiert un éclat et des dimensions plus considérables. Écoutons à ce sujet Humboldt, rapportant dans son *Cosmos* les impressions que lui causa, dans ses voyages, la vue de ce curieux phénomène. « L'intensité lumineuse, beaucoup plus



LA LUMIÈRE ZODIACALE EN EUROPE

Vue le matin, en septembre, avant le lever du Soleil.

grande, que la lumière zodiacale présente en Espagne sur les côtes de Valence et dans les plaines de la Nouvelle-Castille, m'avait engagé déjà, avant que je quittasse l'Europe, à l'observer assidûment. L'éclat de cette lumière, je pourrais dire de cette illumination, augmenta encore d'une manière surprenante, à mesure que je m'approchai de l'équateur sur le continent américain ou sur la mer du Sud. A travers l'atmosphère toujours sèche et transparente de Cumana, dans les plaines d'herbes ou Llanos de Caracas, sur les plateaux de Quito et sur les lacs du Mexique, particulièrement à des hauteurs de huit à douze mille pieds, où je pouvais séjourner plus longtemps, je vis la lumière zodiacale surpasser quelquefois en éclat les plus belles parties de la Voie Lactée, comprise entre la proue du Navire et le Sagittaire, ou pour citer les régions du ciel visible dans notre hémisphère, entre l'Aigle et le Cygne. » (*Cosmos*, t. III, p. 594.)

Un peu plus loin, Humboldt recommande aux savants l'étude suivie du phénomène dans les contrées tropicales, parce que « là, dit-il, l'apparition est perpétuelle, et que les variations météorologiques y sont plus uniformes et plus régulières[1]. »

A quoi tient cette visibilité plus grande de la lumière zodiacale dans les basses latitudes? Outre les raisons d'ordre phy-

1. Il est une autre question qui se pose au sujet de la visibilité de la lumière zodiacale, c'est celle de savoir si, dans la suite des années, elle est soumise à une certaine périodicité. Cassini, dans son Mémoire, infère de diverses observations qu'elle n'a pas toujours été visible, et en même temps il considère comme probable qu'elle avait été vue dans les temps anciens. Des observations plus récentes, celles de Bravais notamment, feraient croire à de telles intermittences. En février 1842, ce savant trouvait à la lueur un éclat pareil à celui de la Voie Lactée, et à cette occasion il faisait la remarque suivante : « Depuis 1832 et 1833, où je vis cette lueur en septembre à Alger, je ne l'avais plus revue, pas même en février ou mars, dans l'hiver que j'ai passé (en 1839-1840) près du Cap nord, lorsque toutes les nuits j'étais attentif aux moindres signes de lueurs célestes. » M. Fasel à Morges (Suisse) en février 1874, M. Plummer en Angleterre en septembre et octobre, enfin M. Gruey à Toulouse en novembre de la même année, s'accordent à reconnaître à la lumière zodiacale un éclat bien supérieur à celui qu'elle avait dans les années précédentes. C'est une question qui réclame de nouvelles études.

sique ou météorologique qu'Humboldt invoque légitimement, il y en a une autre, toute géométrique pour ainsi dire, qui explique en même temps la plus grande visibilité de la lueur, à l'époque des équinoxes, dans les zones tempérées, le soir au printemps et le matin en automne. Cette raison est l'inclinaison de l'axe du cône lumineux sur l'horizon du lieu où l'on observe, inclinaison qui varie selon la latitude et selon l'époque. En effet cet axe coïncide, à peu de chose près du moins, avec l'écliptique, de sorte que, prolongé sous l'horizon, il va passer par le Soleil ou tout au moins s'en éloigne peu. Cette direction paraît constante, mais précisément pour cela l'inclinaison du cône lumineux varie, de la même manière que varie l'inclinaison du cercle de l'écliptique sur l'horizon, soit pour le même lieu d'une heure à l'autre, dans l'intervalle d'une même rotation diurne, ou d'une saison à l'autre pour la même heure, soit pour des lieux différents, selon leur plus ou moins grande distance de l'équateur[1].

1. Ainsi à Paris, l'inclinaison de l'écliptique sur l'horizon oscille entre 17°42′ et 64°37′ environ. Cette inclinaison est la plus grande possible, c'est-



Fig. 250. Position de l'Écliptique au coucher du Soleil, aux Équinoxes, vers le 20 mars et le 22 septembre.

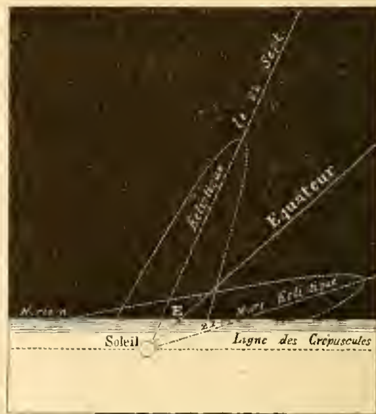


Fig. 251. Position de l'Écliptique au lever du Soleil, aux Équinoxes, vers le 20 mars et le 22 septembre.

à-dire égale à 64°37′, quand le point équinoxial du printemps est sur l'horizon occidental, circonstance qui se présente chaque jour, mais qui coïncide

On comprend donc comment il se fait que la lumière zodiacale, en prenant d'une saison à l'autre toutes les inclinaisons comprises entre ces limites, se dégage plus ou moins facilement des brumes qui couvrent l'horizon par les temps les plus sereins et les ciels les plus purs. A l'équateur, entre les tropiques, où elle se dresse presque toujours dans une direction peu éloignée de la verticale, elle est et doit être constamment visible.

Dans ses contours les plus tranchés, sa forme est celle d'un cône, d'un fuseau lumineux, nous l'avons dit; mais comme elle est formée de deux parties qui paraissent avoir le Soleil pour centre, la forme totale est celle d'un ovale allongé ou d'une ellipse très-aplatie. La ligne qui joint le sommet du matin à celui du soir, en traversant les parties les plus denses ou les plus lumineuses, en est le grand axe, et nous venons de dire que sa direction est peu différente de l'écliptique. Mais cependant les observations prouvent que cette coïncidence n'est point absolue. D'après Cassini, ce serait plutôt avec l'équateur solaire, assertion qui a du reste été contredite depuis. Quant aux dimensions apparentes de la lumière, longueur du grand axe, et largeur de l'axe transverse, elles paraissent variables. Les premiers observateurs donnent des nombres compris entre 40° et 100° pour l'élongation, c'est-à-dire pour la distance angulaire de la pointe extrême du cône au Soleil, et de 8° à 30° pour la largeur à la base. Cassini et Fatio de Duilier avaient

avec le coucher du Soleil vers le 21 mars; ou bien, quand le point équinoxial d'automne est sur l'horizon oriental, circonstance qui coïncide avec le lever du Soleil au 22 septembre. L'inclinaison est au contraire minimum, et égale à 17° 42′, au lever du Soleil à l'équinoxe du printemps ou à son coucher à l'équinoxe d'automne. Les figures 250 et 251 donnent ces diverses situations de l'écliptique, et par suite de l'axe du cône de la lumière zodiacale. Si la latitude du lieu va en diminuant, l'Équateur se relève sur l'horizon, et l'axe avec lui; le contraire a lieu, si l'on se rapproche du pôle. Cela suffit pour rendre compte des variations d'aspect selon les époques ou selon les lieux.

remarqué déjà que la lueur est moins bien terminée sur le bord septentrional que du côté opposé, moins vive et moins étendue le matin que le soir, et enfin plus large au nord qu'au midi de l'écliptique. La figure 252, empruntée à M. Heis, confirme complétement ces deux dernières assertions. La forme irrégulière de l'ellipse totale, la divergence du grand axe d'avec l'écliptique et enfin la position excentrique du Soleil, ressortent si clairement de l'examen de cette esquisse, qu'il n'y a pas lieu d'insister davantage. Dans la nuit du 23 au

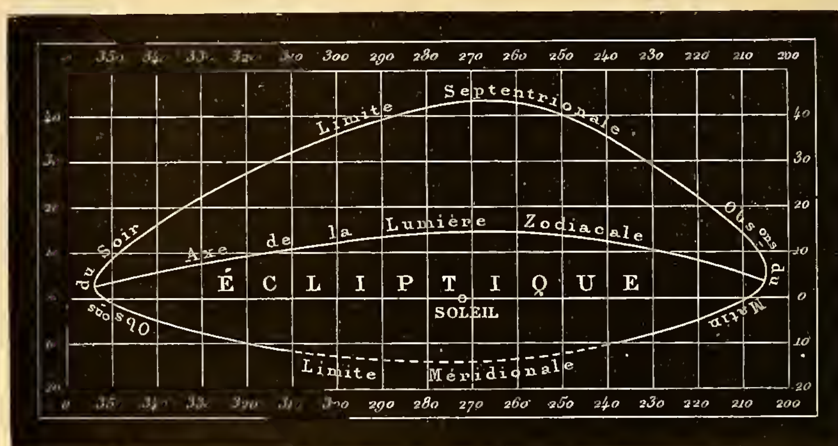


Fig. 252. Limites et contours de la lumière zodiacale, d'après les observations faites à Aix-la-Chapelle, dans la nuit du 23 au 24 décembre 1851, par le docteur E. Heis.

24 décembre 1851, où fut faite l'observation, les limites de la lumière zodiacale se sont presque montrées dans leur entier; une faible partie du bord sud s'est trouvée seule masquée. La longueur totale atteignit 147° 1/2, la largeur 57°, et l'élongation du sommet occidental 80° 1/2[1].

1. Il y en a eu de bien plus considérables. Ainsi, en 1875, cette élongation a mesuré jusqu'à 117°; deux ans auparavant, la lumière zodiacale orientale ou du matin mesurait 111° 1/2 d'élongation. La comparaison des nombreuses observations que nous avons citées, donne une moyenne annuelle de 83° selon Heis, de 88° selon Weber, pour l'élongation occidentale; de 66° (Heis), de 63°.5 (Weber) pour l'élongation de la moitié orientale. L'examen de la figure 253, où nous avons tracé la série des maxima et des minima d'élonga-

Il est un autre point d'une grande importance qui, jusqu'à ces derniers temps, était admis par tous les observateurs européens, nous voulons parler du moûvement propre de la lumière zodiacale, qui se fait dans le même sens que les mouvements planétaires. En effet, abstraction faite des variations de longueur du fuseau, variations qui peuvent modifier d'une nuit à l'autre la position de la pointe sur le firmament, cette

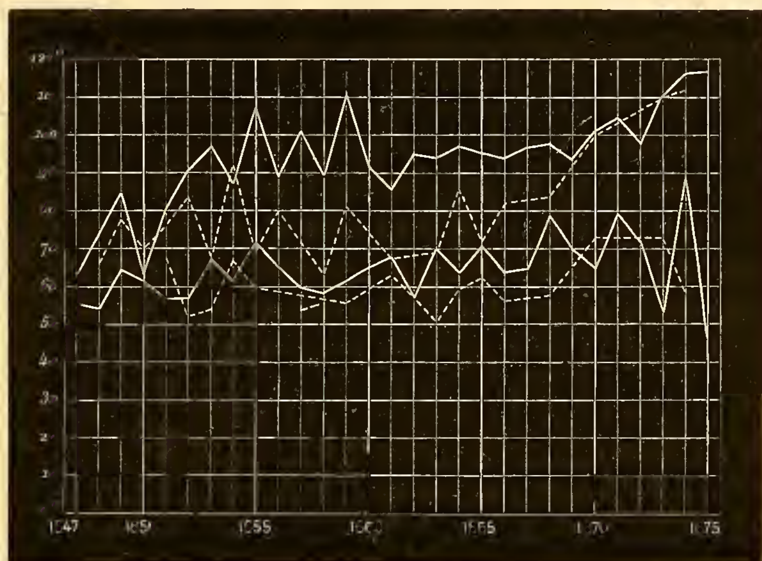


Fig. 253. Maxima et minima d'élongation occidentale et orientale de la lumière zodiacale, d'après Heis et Weber (1847-1875).

pointe marche, comme le Soleil ou les autres corps du système planétaire, en sens contraire du mouvement diurne qui d'ailleurs l'entraîne à chaque instant. Ce mouvement propre constaté place hors de l'atmosphère de la Terre ou dans l'espace cosmique, la cause, quelle qu'elle soit, de la lumière zodia-

tion, d'après les mêmes documents, ne paraît pas révéler de loi régulière de périodicité pour ces variations. Elle confirme seulement le fait de la supériorité constante du fuseau occidental (lignes pleines) sur le fuseau oriental (lignes ponctuées), déjà remarquée par Cassini : cela est vrai aussi bien pour les maxima que pour les minima de chacun d'eux.

cale, et a eu naturellement une influence considérable sur les hypothèses proposées pour son explication[1].

Arrivons maintenant à des observations plus récentes sur la réelle étendue de la lumière zodiacale.

Brorsen, observant en 1854 à Senftemberg (Bohême), découvrit à l'horizon, à l'opposé du Soleil, une lueur faible, sans contours décidés, qu'il continua à voir depuis au même endroit, mais qu'il ne parvint pas à retrouver, quand il observa dans une station plus boréale. Il nomma cette apparence le *reflet* (Gegenschein). « On voit le reflet, dit-il, non-seulement vers le printemps, mais aussi à l'équinoxe d'automne, plus faible cependant à cette dernière époque[2]. »

Humboldt avait observé le reflet avant Brorsen. Pendant son séjour entre les tropiques, le savant auteur du *Cosmos* vit souvent vers l'Orient, après le coucher du Soleil, une lueur qui lui semblait produite par la réflexion de la lumière zodiacale à l'Occident. Mais Brorsen ajouta un détail d'une grande importance, qui a été confirmé par les observations que M. Liais fit en mer, en 1858, à la latitude de 14° N., non loin des côtes d'Afrique : la lumière zodiacale de l'ouest et son reflet oriental étaient réunis par un étroit et léger filet de lumière. M. Gruey, observant le 10 novembre 1874 à Toulouse, aperçut un filet lumineux mince et pâle, allant du

1. Le docteur Heis fait une remarque qui dénoterait une grande régularité dans le mouvement propre de la lumière. Dans la soirée du 27 février 1685, Cassini fixait à 66° la longitude de la pointe de la lumière zodiacale vue à Paris. 179 ans après, cette longitude était de 66° 1/2 selon les mesures faites par Heis à Münster, le 28 février 1864. Cassini, dans la matinée du 4 décembre 1685, assignait au sommet la position de 187° en longitude et de 1° de latitude boréale, et 168 années plus tard, le 4 décembre 1853 au matin, à Münster, Heis trouvait 186° de longitude et + 1° de latitude.

2. Malgré son excellente vue, le docteur Heis n'a pu d'abord apercevoir cette lueur à Münster, à cause de la lumière du gaz : il la vit plus tard en choisissant à la campagne un lieu d'observation favorable. Le docteur Schmidt l'observa à Athènes de 1867 à 1868 ; Schiaparelli, Eylert, Gronemann, Gruey l'ont vue également.

sommet du cône dans le Lion, jusqu'à Aldebaran et aux Pléiades, et ne s'éteignant qu'un peu au-dessus de l'horizon ouest. Il suivrait donc de ces faits, que parfois, sinon toujours, la lumière zodiacale fait le tour entier du ciel.

§ 2. ÉCLAT, COULEUR ET PHASES DE LA LUMIÈRE ZODIACALE.

On a vu que l'éclat, l'intensité de la lueur zodiacale, à l'Occident comme à l'Orient, dépend en grande partie des conditions atmosphériques et de l'inclinaison du cône : elle est beaucoup plus lumineuse au printemps et en automne qu'aux autres époques de l'année, dans les régions tropicales que dans les hautes latitudes.

Cassini, en 1683, la définissait ainsi : « Une lumière semblable à celle qui blanchit la Voye de lait, mais plus claire et plus éclatante dans le milieu, et plus foible vers les extrémitez. » Il la compare aux queues des comètes et constate « qu'elle leur étoit semblable, non-seulement dans la transparence, mais aussi dans la couleur. » Mairan trouvait, dans les jours favorables, que la lumière était plus intense que la Voie Lactée, moins blanche toutefois, et tirant un peu vers le jaune et le rouge dans les parties voisines de l'horizon. Cette teinte rougeâtre, déjà mentionnée par Derham en 1707, fut pareillement remarquée en 1843, par Arago et les autres astronomes de l'Observatoire de Paris, qui purent la comparer à la lumière de la queue de la grande comète alors en vue. La comète, comme la Voie Lactée, paraissait blanche en comparaison de la lueur. MM. Heis et Weber, dans leurs nombreuses observations, n'ont mentionné qu'assez rarement la couleur de la lumière; ils l'ont trouvée le plus souvent jaune, quelquefois rougeâtre, ou d'un jaune orangé. M. Gruey, dont nous avons cité les observations faites à Toulouse, de septembre à novembre 1874, dit que la lueur lui parut jaune-

rougeâtre en septembre, presque blanche en octobre, et blanche en novembre. D'après M. Serpieri, le caractère de la lumière zodiacale a été bien défini par M. Jones, lorsqu'il dit « qu'elle a une teinte *chaude*, *douce*, *jaunâtre*, bien différente de la teinte *froide et blanche* de la Voie Lactée. »

Quant à sa transparence, elle est telle, si l'atmosphère est pure, qu'elle laisse voir au travers les plus petites étoiles. Un groupe d'étoiles, dont 2 de 6e et 2 de 7e grandeur, ont été distinguées nettement par M. Jones dans la partie la plus brillante de la lumière. Mais cette transparence est moindre quelquefois. Le 9 février 1874, M. Fasel, à Morges (Suisse), constatait la difficulté de voir les petites étoiles au travers de la lueur, alors d'un blanc-jaunâtre; Mars lui-même était moins vif. D'après Chacornac, la lumière est assez forte pour effacer les étoiles de 12e à 13e grandeur. « Il n'est pas douteux, m'écrivait-il, que cette matière masque d'un voile rouge-jaunâtre la région du ciel sur laquelle elle se projette. »

Les observations faites en Europe et même sous les tropiques n'avaient montré jusqu'ici la lumière zodiacale que sous un aspect à peu près continu, sauf la dégradation d'intensité lumineuse de l'axe au bord. La forme restait celle d'un simple cône ou portion d'ellipse, comme on l'a vue décrite plus haut. Mais les précieuses observations de M. Jones en Chine, au Japon et dans la mer du Sud, ont révélé le phénomène sous un aspect nouveau, qui ajoute à l'intérêt qu'il inspirait déjà. Nous allons résumer d'après une savante analyse de l'ouvrage du savant américain, faite par M. Serpieri, ces recherches qui, bien que publiées il y a vingt ans, ont tout le mérite de la nouveauté.

D'après M. Jones, la lumière zodiacale est un phénomène beaucoup plus complexe qu'on ne l'avait cru. Elle se compose le plus souvent de quatre parties distinctes, dont voici l'énumération. A la base du cône principal s'élève, sous des formes variées, une lumière brillante (*effulgent light*, ou *luce*

fulgente); tantôt, c'est un jet isolé vers l'axe du cône, une langue aiguë de lumière; tantôt, c'est une masse lumineuse dont les contours se découpent irrégulièrement sur l'horizon. Vient ensuite le cône central principal (*light stronger, luce centrale*) qui constitue la lueur la plus généralement visible : puis, tout autour et enveloppant ce cône comme d'un manteau, est la lumière diffuse (*light diffuse, luce diffusa*), au delà de laquelle s'étend encore un voile lumineux très-faible, pareil à une légère pâleur du firmament (*luce pallida*). Chacune de ces lueurs est assez distincte pour qu'on en puisse dessiner les contours. Le 4 juillet 1853, entre 8 heures et 10 heures du soir, voici quelles étaient les dimensions de ces trois dernières parties de la lumière zodiacale :



Fig. 254. Les diverses parties de la lumière zodiacale : lumière brillante, cône central, lumière diffuse et *luce pallida*. D'après les observations de G. Jones.

Lumière centrale.	47°	à	59°	d'élongation.
Lumière diffuse	73	»	100	—
Lumière pâle.	—	»	139	—

Cette dernière avait la forme d'une vaste parabole qui, à 40° au-dessous de son sommet, mesurait encore 81° en largeur. Les figures 255 et 256 représentent deux observations de la lumière zodiacale faites à Buenos-Ayres, par M. Eylert, en 1873. Dans l'une, on voit nettement le cône

central et la lumière diffuse ; dans l'autre, la partie la plus lumineuse se réduit à une sorte de ligne brillante, de 1/2° de largeur, qui part du sommet du cône. Dans ses observations de 1874, à Peckeloh, M. Weber note fréquemment le cône intérieur et l'enveloppe diffuse (*Innerer Kegel* et *Mantel*).

Voici maintenant toute une série de phénomènes, relatifs aux variations d'aspect et de dimensions des diverses parties de la lumière zodiacale, dans le cours d'une même appari-



Fig. 255. Lumière zodiacale, d'après M. Eylert ; le 11 août 1873, à Buenos-Ayres.

Fig. 256. Cône central et lumière diffuse d'après M. Eylert ; le 13 sept. 1873.

tion ; M. Serpieri donne à ces variations le nom de *phases*. En voici la description d'après l'astronome italien.

I. *Phases de la Lumière zodiacale.* — 1° « La lumière occidentale est sujette à monter chaque soir le long de l'écliptique, contrairement au mouvement (diurne) des étoiles, se portant à des distances toujours croissantes du Soleil, augmentant parfois, dans une même soirée, de 40° à 60°. La lumière orientale descend chaque matin sur l'écliptique, se portant à des distances toujours moindres du Soleil, qui baissent quelquefois de 40° dans une même matinée.

2° « Ni les variations de l'état de l'atmosphère, ni les crépuscules du matin ou du soir, ne sont la cause des phases d'élévation ou d'abaissement de la lumière zodiacale, mais



LA LUMIÈRE ZODIACALE

AU JAPON

d'après les Observations de G. Jones.

E. Guillemin et Ph. Benoist, del. — Imp. Fraillery, Paris

une force intime inconnue d'une très-grande puissance développe ces phases, en reproduisant toujours la même forme générale du phénomène intérieur.

II. *Variations de la Lumière zodiacale du Couchant.* — 1° « Dans les premières heures du soir, l'accroissement du cône central occidental oscille autour de la valeur moyenne horaire de 15°, qui de fait se présente plusieurs fois avec une grande précision; comme si le cône était adhérent à la Terre, ou que la rotation terrestre fût cause, d'une façon ou d'autre, de ses augmentations progressives.

2° « Aussitôt que le cône s'élève au sommet, sa base se perd toujours dans les brumes de l'horizon; et pour cela même, la longueur du cône ne varie point, parce que son sommet s'élève d'un pas égal avec l'horizon.

III. *Variations de la Lumière zodiacale du Levant.* — 1° « La lumière zodiacale du matin, centrale et diffuse, dans ses abaissements progressifs vers le Soleil, présente des variations maxima vers l'approche de l'aube, c'est-à-dire de 2 h. 1/2 à 1 h. 1/2 avant le lever du Soleil.

2° « Dans le cône occidental comme dans le cône oriental, les phases de la lumière diffuse sont moins promptes et moins étendues que celles de la lumière centrale, et souvent cessent quand les autres continuent encore, comme si la cause inconnue qui préside au phénomène, opérait directement sur la lumière centrale, et indirectement sur la lumière diffuse.

3° « Le mouvement descendant du cône oriental dans les heures voisines de l'aube correspond au mouvement de rotation du globe, comme si le cône n'était pas placé dans le ciel et séparé du globe, mais attaché à la Terre.

4° « Les phases opposées du matin et du soir, c'est-à-dire les phases d'élévation de la lumière occidentale et d'abaissement de la lumière orientale, cessent de paraître opposées, si on les considère en rapport avec le lieu du Soleil; parce que, pour des positions identiques du Soleil ou d'égales différences des

mêmes positions, les deux cônes changent leurs élongations de la même quantité et dans le même sens.

5° « Il semble que l'égalité des phases matinales et nocturnes, leurs causes et leurs lois sont l'effet d'une même tendance qu'ont les deux cônes, occidental et oriental, à suivre le mouvement de leur horizon et non pas le cours du Soleil, tendance à laquelle ils obéissent plus librement pour de moindres distances du Soleil.

IV. *Mode d'apparition de la Lumière zodiacale.* — 1° « Souvent, à la fin du crépuscule du soir, la lumière zodiacale se montre assez haute, mais souvent aussi elle est cachée et enveloppée sous la courbe crépusculaire, dont elle se sépare rapidement ; tantôt se montre le premier le cône central, qui semble darder tout autour la lumière diffuse ; tantôt c'est la lumière diffuse, au sein de laquelle se détache plus tard le cône central.

2° « Chaque soirée se dissipe ce qui s'est formé chaque soirée ; le cône central, accrû chaque soir en hauteur et en éclat, se répand et se perd dans le manteau de la lumière diffuse, qui se renforce alors et à son tour s'affaiblit et meurt. »

On comprend de quelle importance sont ces observations nouvelles, dont aucune théorie n'a pu jusqu'ici tenir compte, puisqu'elles n'avaient point encore été relevées.

§ 3. POLARISATION ET ANALYSE SPECTROSCOPIQUE DE LA LUMIÈRE ZODIACALE.

Avant d'aborder les hypothèses qu'on a proposées pour l'explication cosmique ou physique du phénomène, disons ce qu'on sait de la lumière considérée en elle-même. Est-ce la lumière réfléchie du Soleil, ou une lumière propre émanée d'une matière incandescente ou phosphorescente?

Le télescope, Humboldt le reconnaît dans son *Cosmos*, n'avait pu élucider la question ; il ne décelait dans la lueur rien qui eût une apparence d'étoiles, de points lumineux isolés. Arago, en mars 1843, appliqua le polariscope à la lumière zodiacale ; les deux images données par l'instrument n'accusèrent ni une différence de couleur ni une variation d'intensité. M. Liais, en 1858, bien qu'observant sous l'équateur et avec un polariscope chromatique, ne fut pas plus heureux. Mais ces résultats négatifs n'étaient pas définitifs, ainsi que l'illustre secrétaire de l'Académie des sciences l'avait fort bien soupçonné. Avec des instruments plus sensibles et des précautions particulières pour donner à sa vue toute la pénétration possible, un observateur américain, M. A. Wright, a reconnu au contraire la polarisation de la lumière zodiacale, dans un plan qui passe par le Soleil; la proportion de lumière polarisée n'est pas moindre, selon lui, de 15 à 20 pour 100. Entre autres conclusions de ses observations, faites en janvier et février 1874, M. Wright donne celle-ci : « La lumière provient du Soleil et est réfléchie par une matière solide. Cette matière consiste en petits corps ou météorides, faisant leurs révolutions autour du Soleil dans des orbites voisines de l'écliptique. »

Ce qui, dans cette conclusion, concerne l'état physique de la matière réfléchissante, est déduit des observations spectroscopiques, que fit à la même époque le savant américain. Il trouva en effet, pour le spectre de la lumière, « un spectre continu, ne différant pas sensiblement (sauf en ce qui concerne l'intensité), du spectre solaire, dépourvu en tout cas de toute ligne ou bande brillante analogue à celle de l'aurore boréale. » Le résultat important de la continuité du spectre de la lumière zodiacale avait été obtenu antérieurement par M. P. Smyth, puis par M. Liais, qui croyait cependant à la possibilité de l'existence de faibles lignes noires. Mais il faut dire que d'autres observations contredisent complétement celles que nous

venons de rapporter. M. Respighi, en janvier et février 1872, analysa la lumière zodiacale à l'aide d'un spectroscope à vision directe, et « il trouva bien marquée la raie connue d'Angström dans le vert, » raie qu'il observa à la même époque dans le spectre d'une aurore boréale. « Ce fait, dit M. Respighi, que confirme une observation semblable, faite par Angström en mars 1867, me semble assez important, car il tendrait à montrer l'identité de la lumière de l'aurore boréale avec la lumière zodiacale, et par suite la probabilité de l'identité de leur origine. »

M. Tacchini, en rapportant les observations de M. Wright, rappelle qu'en avril 1872, il analysa, avec M. P. Smyth, la lumière zodiacale, qu'il lui trouva un spectre continu; mais que néanmoins il y avait une zone vive nettement limitée, qui se fondait latéralement, ce qu'on n'obtient jamais d'une faible lumière solaire. Le savant astronome de Palerme croit pouvoir en conclure que « la lumière zodiacale n'est pas seulement la lumière solaire réfléchie par des corpuscules météoriques; outre les particules solides capables de donner, par réflexion, le spectre et la polarisation observées par M. Wright, la masse lenticulaire peut renfermer quelque substance maintenue par la chaleur solaire dans un état physique tel, qu'il en résulte un spectre particulier analogue au spectre des comètes ou de l'atmosphère coronale. »

Il reste à savoir si ces observations qui, sans être contradictoires, ne sont pas concordantes, n'ont pas leur raison dans les variations accidentelles de la lumière zodiacale. Mairan avait signalé déjà dans la lueur des changements d'éclat de courte durée, qui se manifestaient dans le cours d'une même nuit, et auxquels il appliquait le mot de scintillation. Humboldt, observant dans les régions tropicales de l'Amérique du Sud, vit souvent la lumière, quand elle venait d'atteindre son maximum d'intensité, s'affaiblir tout à coup, puis reprendre peu après et tout aussi vite son éclat primitif : il lui semblait

que la pyramide lumineuse était traversée par une rapide ondulation. M. Liais, au Brésil, n'a pu constater ce genre de fluctuations, qui pourraient avoir pour cause, aussi bien des variations dans les couches atmosphériques, que des changements réels dans la lumière zodiacale. Mais, si l'on n'est pas sûr que les variations rapides dont nous parlons proviennent de modifications réelles dans le phénomène, il est certain qu'il en subit de telles dans le cours de ses apparitions mensuelles ou annuelles ; et cela suffirait à expliquer les différences des résultats obtenus à l'aide de l'analyse spectrale.

§ 4. HYPOTHÈSES SUR LA NATURE DE LA LUMIÈRE ZODIACALE.

Dominique Cassini, le premier observateur assidu de la lumière zodiacale en Europe, est aussi le premier qui ait déduit de ses observations une théorie du phénomène, et cette théorie est encore aujourd'hui, dans ses traits essentiels, la plus généralement adoptée des astronomes.

Le mouvement propre du cône lumineux vers l'Orient, c'est-à-dire dans le sens du Soleil, difficile à constater d'une soirée à l'autre, à cause de la terminaison mal limitée du cône et de ses variations en longueur, a été nettement reconnue par lui, d'un mois au mois suivant. La direction de son axe qui passe à peu de chose près par le lieu du Soleil, et qui est couché, sinon dans l'écliptique, du moins dans un plan peu différent, lui parut coïncider avec l'équateur solaire. L'apparence elliptique ou lenticulaire du cône lumineux s'accordait bien, selon lui, avec l'hypothèse de l'existence, dans le plan de cet équateur, d'une matière répandue dans l'éther, et rayonnant vers la Terre soit une lumière propre, soit la lumière réfléchie du Soleil. Enfin, les élongations de 75°, de 90° et même de 100°, mesurées par le célèbre astronome, prouvaient que l'étendue de la lumière zodiacale va du Soleil jusqu'au

delà de l'orbite de Vénus, atteint même et dépasse, dans certain cas, l'orbite de la Terre.

Quant aux variations d'étendue que présente la lumière zodiacale dans le cours d'une année, ou dans les années successives, Cassini s'en rendait compte en la supposant sujette aux mêmes vicissitudes que les taches du Soleil; il attribuait au Soleil une tendance à refouler la matière dans le plan de son équateur[1], et cette force impulsive variait d'intensité dans le cours des années comme celle qui donne naissance aux taches et aux facules. Enfin, frappé de la similitude d'apparence de la lumière zodiacale, de la Voie Lactée et de certaines nébuleuses, Cassini se demandait si cette lueur n'était pas formée d'une infinité de corps, de petites planètes, comme les autres le sont d'une multitude d'étoiles.

Mairan adopta les vues de Cassini sur la disposition de la lumière zodiacale ; mais il la considérait comme étant l'atmosphère même du Soleil, ne réfléchissant point que, selon les lois de la dynamique, l'atmosphère d'un corps soumis à un mouvement de rotation ne peut s'étendre au delà du point où la force centrifuge fait équilibre à la pesanteur; ce point, pour le Soleil, n'atteint pas l'orbite de Mercure.

Euler admettait la forme lenticulaire de la lumière zodiacale; mais il ne croyait pas que la matière dont elle est formée s'étendît jusqu'au Soleil, et il en faisait un anneau qui entoure cet astre à distance, comme l'anneau de Saturne entoure cette planète. Bien que partisan de la théorie des ondes lumineuses, il donnait pour origine et pour cause à cette matière l'impulsion des rayons sur l'atmosphère primitive, très-étendue, du Soleil. Ces idées d'Euler et celles de D. Cassini

1. « Le Soleil même, dit-il, pourroit bien envoyer par son mouvement autour de son axe, selon le plan de l'équinoxial et selon ceux des orbes de Mercure et de Vénus, jusqu'à l'orbe de la Lune, de la matière d'une subtilité médiocre, capable de faire une réflexion ou une réfraction particulière de ses rayons, en sorte qu'elle nous fît l'apparence de cette lumière. »

semblent une ébauche de la grande hypothèse de Laplace sur l'origine et la formation du monde solaire. Voici ce que le grand géomètre dit à propos de la lumière zodiacale : « Si dans les zones abandonnées par l'atmosphère du Soleil, il s'est trouvé des molécules trop volatiles pour s'unir entre elles ou aux autres planètes, elles doivent, en continuant de circuler autour de cet astre, offrir toutes les apparences de la lumière zodiacale, sans opposer de résistance sensible aux divers corps du système planétaire, soit à cause de leur extrême rareté, soit parce que leur mouvement est à fort peu près le même que celui des planètes qu'elles rencontrent. »

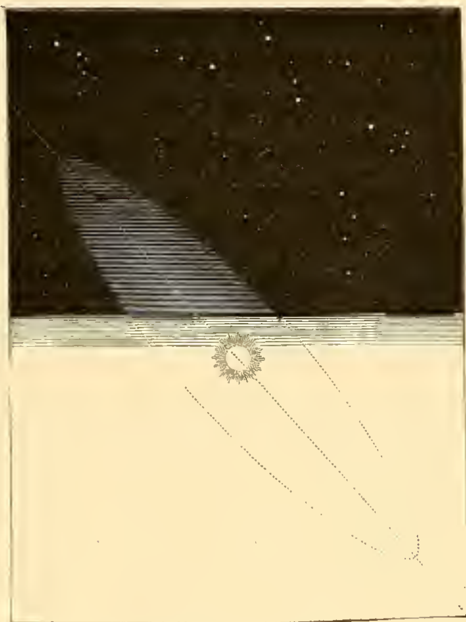


Fig. 257. Théorie de la lumière zodiacale. Hypothèse d'un anneau lenticulaire ayant le Soleil pour centre.

Tous les savants que nous venons de citer, et il faut joindre à leurs noms ceux d'Arago, de Humboldt, de sir J. Herschel, de Biot, sont d'accord pour attribuer la lumière zodiacale au Soleil, faisant de cet astre le centre, tantôt d'une enveloppe plus ou moins plane ou lenticulaire, tantôt d'un anneau nébuleux plus ou moins aplati (fig. 257). Ils ne se prononcent point sur sa forme extérieure, sur la question d'une excentricité plus ou moins forte, qui pourrait rendre compte des variations de son étendue apparente.

Mais il nous reste à signaler une hypothèse bien différente due à M. G. Jones, le savant observateur de la lumière zodiacale au Japon, en Californie et dans les mers australes.

Ce n'est point le Soleil, mais la Terre qui est, pour lui, le centre de la nébulosité lumineuse : en un mot, la lumière zodiacale est un anneau de la Terre, intérieur à l'orbite de la Lune, et c'est la lumière du Soleil réfléchie par la matière dont il est composé qui rend compte des apparences observées. Il s'appuie sur la loi de Bouguer, d'après laquelle la quantité des rayons réfléchis diminue à mesure que l'angle d'incidence augmente; sous une certaine incidence, les rayons réfléchis sont en si petite quantité qu'ils ne sont plus perceptibles; de là vient que la portion visible de l'anneau ne s'étend que jusqu'à une certaine hauteur au-dessus de l'horizon, hauteur variable avec l'inclinaison de cet horizon sur les rayons solaires (par l'effet du mouvement diurne), et que la largeur de cette portion diminue vers le sommet du fuseau lumineux. M. Jones présente encore à l'appui de sa théorie les faits suivants qui résultent de ses observations : « 1° Quand j'étais au nord de l'écliptique, la partie principale de la lumière zodiacale se voyait au nord de cette ligne; quand je me trouvais au sud, la lumière se voyait du côté méridional; quand ma position était sur l'écliptique ou voisine de ce plan, la lumière était partagée également par l'écliptique. 2° Quand, par la rotation de la Terre, j'étais rapidement entraîné vers l'écliptique ou éloigné de ce plan, le changement du sommet du cône et de la direction de ses limites était égal et correspondant à mon propre mouvement; enfin, avec les changements de position de l'écliptique, la forme tout entière de la lumière zodiacale se trouvait changée. »

Nous avons résumé les faits et les hypothèses. C'est tout ce que nous pouvions faire dans l'état actuel de la science, sur ce phénomène toujours mystérieux de la lumière zodiacale.

DEUXIÈME PARTIE

LE MONDE SIDÉRAL

DEUXIÈME PARTIE

LE MONDE SIDÉRAL

LIVRE PREMIER

LES ÉTOILES

Parmi les météorites qui viennent de temps à autre, par le hasard des rencontres, frôler notre atmosphère, y faire explosion et jeter sur le sol des débris de leurs masses, il en est, nous l'avons vu, qui ont une origine étrangère au monde solaire. Ces visiteurs de notre système, échappés aux profondeurs des espaces intersidéraux, sont généralement animés, au moment de leur passage dans le voisinage de la Terre et du Soleil, d'une vitesse considérable. Imaginons, pour nous faire une idée de l'immensité du voyage accompli par l'un d'eux, que ce corps l'ait effectué tout entier avec la vitesse maximum, et prenons pour moyenne de cette vitesse le double de celle de la Terre, soit environ 60 kilomètres par seconde. Dans ces conditions, cherchons depuis quand la météorite en question a quitté les régions stellaires d'où elle est partie; depuis quand, par exemple, dure sa dernière étape, celle qui

s'étend entre notre monde solaire et la moins éloignée des étoiles connues. Le calcul donne au minimum 16000 ans! En vérité, le voyage a duré beaucoup plus longtemps, la vitesse moyenne du corpuscule céleste ayant presque toujours été bien au-dessous de la vitesse supposée. Mais l'exemple choisi suffit pour donner une idée de l'immensité de l'espace que nous allons avoir à franchir, si, du monde solaire ou planétaire, nous passons à l'exploration de l'univers sidéral.

En abordant les régions lointaines du ciel, où brillent les étoiles, il faut donc avoir sans cesse présente à l'esprit cette idée, que jusqu'à présent notre exploration s'est accomplie à l'intérieur d'une région de l'espace très-limitée, très-voisine de la Terre, très-accessible dès lors aux investigations télescopiques. Grâce à cette proximité relative, l'étude des corps célestes de notre système a pu fournir les renseignements les plus précis sur chacun d'eux, sur leur forme, leurs dimensions, les détails physiques de leurs surfaces. Mais la distance des étoiles est si considérable, que des détails aussi circonstanciés sur chacune d'elles ne sont plus possibles : les instruments d'optique sont impuissants à percer de telles profondeurs. Toutefois, les connaissances acquises en astronomie sidérale sont loin de le céder en intérêt à celles de l'astronomie solaire. Ce n'est plus d'ailleurs un coin isolé de l'univers, mais l'univers même dans son ensemble qui peu à peu va se révéler à nous ; c'est sa structure générale, son étendue, la composition et la distribution des groupes d'astres dont il est formé. Les résultats obtenus depuis deux siècles dans cet ordre de recherches ont déjà conduit aux plus hautes spéculations, et si la richesse et la variété des détails font parfois défaut dans cette branche de la science, une telle lacune se trouve largement compensée par l'imposante grandeur et la majesté de l'ensemble.



LE CIEL DE L'HORIZON DE PARIS

I

LES ÉTOILES

§ 1. SCINTILLATION DES ÉTOILES. FIXITÉ APPARENTE.

Nul spectacle, disais-je au début de cet ouvrage, n'est à la fois aussi touchant et aussi grandiose que celui du ciel par une belle nuit. Si l'on a soin de choisir pour observatoire une station bien à découvert, comme l'est une plaine unie, le sommet d'une colline ou encore l'horizon de la mer; et si l'atmosphère un peu humide possède toute sa transparence et sa pureté, on voit des milliers de points lumineux étinceler de toutes parts, accomplissant lentement et avec ensemble leur marche silencieuse. Le contraste de l'obscurité qui règne à la surface de la Terre avec cette voûte resplendissante donne une profondeur indéfinie à l'océan céleste qui surplombe nos têtes. Mais laissons là la magnificence du spectacle, pour l'étudier lui-même dans ses plus minutieux détails.

Commençons par nous occuper des apparences.

Un premier caractère commun à toutes les étoiles, c'est un changement d'éclat, incessant et très-rapide, qui a reçu le nom de *scintillation*[1]. Ce phénomène est accompagné de va-

1. Arago définit ainsi le phénomène : « Pour une personne regardant le ciel à l'*œil nu*, la scintillation consiste en des changements d'éclat des étoiles

riations de couleurs également brusques, qui ont la même cause que les disparitions et réapparitions successives de la lumière. Toutes les étoiles scintillent, quel que soit leur éclat, du moins dans nos régions tempérées. Mais l'intensité de ce mouvement lumineux n'est pas la même pour toutes, et d'ailleurs elle varie à la fois avec le degré de pureté du ciel, avec l'élévation des étoiles au-dessus de l'horizon, et avec la basse température des nuits; pour les petites étoiles, elle est assez forte pour amener par moments leur disparition complète. Selon Arago, la scintillation est due à la différence de vitesse des rayons de diverses couleurs traversant les couches atmosphériques, inégalement chaudes, denses ou humides[1]. Aussi dans les régions tropicales, où les couches atmosphériques sont plus homogènes, n'observe-t-on plus de scintillation pour les étoiles dont la hauteur au-

très-souvent renouvelés. Ces changements sont ordinairement, sont presque toujours accompagnés de variations de couleurs et de quelques effets secondaires, conséquences immédiates de toute augmentation ou diminution d'intensité, tels que des altérations considérables dans le diamètre apparent des astres, ou dans les longueurs des rayons divergents qui paraissent s'élancer de leur centre, suivant diverses directions.» On observe la scintillation dans les lunettes; Simon Marius, Nicholson, Arago ont donné divers procédés pour étudier de cette façon le phénomène, dont les phases deviennent alors beaucoup plus rapides et plus tranchées qu'à l'œil nu. Nicholson a pu constater que la lumière de Sirius change distinctement de couleur, avant d'arriver à l'œil, au moins trente fois par seconde (on trouvera plus loin d'autres curieux résultats de ce genre, obtenus par M. Montigny). Ainsi que nous le disons plus loin, c'est à François Arago qu'est due la théorie partout admise aujourd'hui de la scintillation : elle est basée sur la théorie des interférences et consiste à attribuer les changements d'éclat et de couleur de la lumière d'une étoile aux chemins inégaux qu'ont parcourus les ondes lumineuses dans leur trajet au sein de l'atmosphère. Il en résulte des destructions alternatives partielles dans la partie rouge, verte, bleue, etc., du faisceau lumineux et par suite des variations d'éclat et de couleur. (Voy. dans l'*Annuaire du Bureau des Longitudes pour* 1852, la notice d'Arago sur la scintillation, et les notes de MM. Wolf et Montigny, *Comptes rendus*, 1868.)

1. La scintillation est généralement plus forte aux époques où les temps d'orage et de pluie sont proches. Les vents violents, le temps alternativement serein et couvert, sont favorables au phénomène.

dessus de l'horizon dépasse 15°, ou le sixième de la distance de l'horizon au zénith. « Cette circonstance, dit Humboldt, donne à la voûte céleste de ces contrées un caractère particulier de calme et de douceur. » Quant aux planètes, elles scintillent peu ou point; il est rare qu'on observe des traces de ce phénomène dans Saturne et dans Jupiter, mais il est plus sensible pour Mars, et souvent assez marqué dans Vénus et surtout dans Mercure. Cette différence suffit souvent, dans nos climats, pour donner un premier moyen de distinguer une planète d'une étoile, lorsqu'on n'est pas très-familier avec la configuration des groupes célestes.

Un autre caractère spécifique des étoiles, c'est que leurs diamètres sont sans dimensions appréciables. A l'œil nu, cette distinction serait insuffisante, puisque, la Lune et le Soleil exceptés, les planètes les plus considérables n'ont pas non plus de diamètres sensibles. Mais, tandis que le grossissement des instruments d'optique nous montre les planètes principales sous la forme de disques nettement terminés, les lunettes les plus puissantes ne font jamais voir une étoile que comme un point lumineux, dont les dimensions sont d'autant plus faibles, que le grossissement est plus fort et l'instrument plus parfait. La distance qui nous sépare de ces astres est si grande, qu'il n'y a pas lieu de nous étonner d'un tel résultat. Wollaston affirmait que le diamètre apparent de la plus brillante étoile du ciel, de Sirius, ne vaut pas la cinquantième partie d'une seconde d'arc. Mais hâtons-nous de dire que ce résultat laisserait encore une belle marge aux dimensions réelles de cette étoile, puisque, à la distance où elle se trouve de nous, un diamètre apparent aussi petit représenterait néanmoins un diamètre réel de 6 750 000 lieues : c'est encore près de 20 fois le diamètre de notre Soleil. Nous reviendrons sur ce point. Mais il faut ajouter que l'absence de dimensions apparentes appréciables ne suffirait pas pour distinguer absolument les étoiles des pla-

nètes, puisqu'un certain nombre de celles-ci n'apparaissent elles-mêmes dans les télescopes que comme de simples points lumineux. Arrivons donc au caractère spécifique permanent, dont la constatation empêchera toujours de confondre une étoile avec l'un des astres qui font partie de notre groupe solaire. Ce caractère, le voici :

Les étoiles proprement dites conservent entre elles, à très-peu de chose près, leurs distances relatives. Elles forment donc, sur la voûte céleste, des groupes apparents d'une configuration presque invariable : il faut des années, quelquefois des siècles pour constater leur changement de position, et encore n'est-ce qu'à l'aide de mesures extrêmement délicates. Une planète au contraire se déplace rapidement en traversant ces groupes, au point que dans l'intervalle d'une nuit ce déplacement est très-sensible. De là l'ancienne dénomination d'*étoiles fixes*, par opposition aux étoiles *errantes* ou *planètes*. Il faut toutefois se garder de donner à cette dénomination de *fixes* une rigueur absolue qu'elle n'a pas, et l'on verra bientôt que les étoiles se meuvent réellement avec une rapidité qui ne le cède en rien à celle qui anime les astres de notre système. L'immense éloignement est seul cause de cette immobilité apparente, qui n'existe plus dès que des observations précises embrassent un intervalle de temps suffisant.

§ 2. CLASSIFICATION DES ÉTOILES PAR ORDRE DE GRANDEUR. PHOTOMÉTRIE STELLAIRE.

Un fait qui frappe tout le monde, c'est la grande diversité d'éclat des étoiles qui parsèment le ciel. On y remarque tous les degrés d'intensité, depuis la lumière éblouissante de Sirius jusqu'à la lumière à peine perceptible des dernières étoiles visibles à l'œil nu. D'où vient cette différence d'éclat? C'est

ce qu'on ne saurait dire d'aucune étoile en particulier; mais il est facile de comprendre qu'elle peut résulter de circonstances multiples, telles que le plus ou moins grand éloignement, les dimensions réelles et variées des astres, enfin l'éclat intrinsèque de la lumière propre à chacun d'eux. Quoi qu'il en soit, les astronomes, sans se préoccuper d'abord des causes inconnues qui peuvent influer sur l'intensité de la lumière stellaire, ont partagé les étoiles en classes ou *grandeurs*. Quand on parle d'une étoile de *première*, de *seconde*, de *cinquième grandeur*, il est donc bien entendu que cette façon de parler est tout entière relative à l'intensité apparente, et qu'il n'en faut rien préjuger, ni sur les dimensions réelles de l'astre, ni sur sa distance, ni même sur son éclat intrinsèque[1].

D'ailleurs, comme les étoiles rangées par ordre d'éclat formeraient une progression décroissant par degrés insensibles, les classes adoptées sont toutes de convention et dès lors arbitraires. Les six premières grandeurs comprennent toutes les étoiles visibles à l'œil nu. Mais l'emploi des télescopes les plus puissants permet aujourd'hui d'apercevoir des étoiles d'un éclat beaucoup plus faible, et qui peut descendre jusqu'à la 17e et la 18e grandeur. En vérité la progression n'a pas de limite inférieure; elle s'étend de plus en plus, à mesure que les progrès de l'optique augmentent le pouvoir de pénétration des instruments.

Pour se faire une idée des intensités lumineuses respectives des étoiles des six premiers ordres de grandeur, suivant l'échelle adoptée par les astronomes, on n'a qu'à jeter les yeux sur la figure 258, où les étoiles sont figurées par des

1. Ce que nous disons ici d'une étoile particulière n'est plus vrai rigoureusement, quand on considère l'ensemble des étoiles. On verra plus loin que le calcul des probabilités permet, dans ce cas, de déduire de l'éclat des étoiles d'une certaine grandeur des conséquences sur leur distance moyenne.

disques dont la surface est en raison de leur éclat. Mais, je le répète, il ne faut pas croire que les étoiles rangées dans une même classe soient toutes pour cela de même intensité. C'est ainsi, on va le voir, que la lumière de Sirius vaut quatre fois au moins celle de l'étoile Alpha de la constellation du Centaure ; et cependant, l'une et l'autre sont mises par les astronomes au nombre des étoiles de première grandeur. Aussi s'est-on trouvé dans l'obligation d'adopter des classes intermédiaires, qu'on distingue par les numéros d'ordre des classes voisines principales. Ainsi entre la 1re



Fig. 258. Éclat relatif des étoiles types des six premières grandeurs (les surfaces des disques étant proportionnelles aux intensités).

et la 2e grandeur, il y a les étoiles de 1.2 et de 2.1 grandeur ; entre la 2e et la 3e, celles de 2.3 et de 3.2, etc.[1]. Voici les noms des vingt et une étoiles les plus brillantes

1. C'est à cette série qu'on donne le nom d'*échelle vulgaire*, qui comprend ainsi trois degrés pour chaque ordre de grandeur, à l'exception du 1er ordre, lequel n'a que deux degrés (pour la régularité nous proposerions d'y joindre 1.0 renfermant les étoiles de première grandeur les plus brillantes). Sir J. Herschel, ayant fait à l'astromètre des mesures comparatives d'intensité des étoiles des diverses grandeurs, exprima les grandeurs décroissantes par les nombres ordinaires suivis d'une partie décimale. En procédant ainsi, il reconnut qu'en additionnant la partie décimale constante 0.414 à tous les nombres de la série, les intensités correspondant aux grandeurs successives 1re, 2e, 3e, etc., seraient précisément celles que prendrait la lumière d'une étoile de premier ordre (l'étoile α du Centaure étant choisie comme unité ou étoile normale de première grandeur), dans l'hypothèse où cette étoile s'éloignerait aux distances 1, 2, 3, etc. La nouvelle échelle ainsi obtenue est ce que l'on nomme l'*échelle photométrique* des grandeurs, d'ailleurs peu différente de l'échelle vulgaire. Le Dr Galle fait ressortir en ces termes l'avantage de l'échelle photométrique : « Si l'on élève au carré, dit-il, le nombre qui re-

des deux hémisphères, qu'on a coutume de considérer comme formant la première classe : elles sont ici rangées par ordre d'éclat :

1 Sirius.	8 Wéga.	15 Antarès.
2 Êta d'Argo[1].	9 Procyon.	16 Ataïr.
3 Canopus.	10 Betelgeuse[2].	17 L'Epi de la Vierge.
4 Alpha du Centaure.	11 Achernar.	18 Fomalhaut.
5 Arcturus.	12 Aldebaran.	19 Bêta de la Croix.
6 Rigel.	13 Bêta du Centaure.	20 Régulus.
7 La Chèvre.	14 Alpha de la Croix.	21 Pollux.

La classification des étoiles par ordre de grandeur suffit aux besoins ordinaires de la science, c'est-à-dire à la distinction et à la désignation de telle ou telle étoile observée. Il n'en est plus de même, si l'on aborde certains problèmes relatifs à l'état physique des astres, par exemple à leur variabilité. En ce cas, il serait très-important d'avoir des moyens rigoureux d'évaluation de l'intensité lumineuse de chaque étoile à une époque donnée. L'échelle photométrique de sir J. Herschel répond en partie à cet objet. Arago a donné une méthode et commencé des expériences dans le même but ; un physicien contemporain, M. Seidel, a également étudié cette question de photométrie stellaire, et tout récemment un savant français, M. Trépied, a repris la méthode d'Arago, en cherchant à tenir compte des circonstances atmosphériques, de la hauteur des étoiles observées, etc. Les résultats obtenus ne sont pas concordants autant qu'il serait désirable. C'est une étude aussi déli-

présente la grandeur photométrique d'une étoile, on obtient l'inverse du rapport de la quantité de lumière à celle de α du Centaure. Par exemple, κ d'Orion ayant 3 pour grandeur photométrique, émet 9 fois moins de lumière que α du Centaure ; et en même temps ce nombre 3 indique que κ d'Orion doit être 3 fois plus éloigné de nous que α du Centaure, si ces deux étoiles sont des astres d'égale grandeur linéaire et d'égal éclat. »

1. On verra plus loin que l'éclat de cette étoile a subi d'étonnantes transformations; elle est descendue récemment à la sixième grandeur.

2. L'éclat de cette étoile est variable.

cate et difficile qu'elle est importante. Voici quelques nombres relatifs aux étoiles de première grandeur :

NOMS DES ÉTOILES.	GRANDEURS		INTENSITÉS COMPARÉES.			
	vulgaires.	photométriques.	J. Herschel.	Laugier.	Trépied.	Seidel.
Sirius (α Gd Chien). .	0.08	0.49	4.052	1000	1000	513
Canopus (α Navire). .	0.29	0.70	1.994	»	»	»
α Centaure	0.59	1.00	1.000	»	»	»
Arcturus (α Bouvier).	0.77	1.18	0.726	»	»	84
Rigel (β Orion). . . .	0.82	1.23	0.654	439	752	130
La Chèvre (α Cocher).	1.00	1.41	»	»	»	83
Wéga (α Lyre)	1.00	1.41	0.446	617	»	100
Procyon (α Pt Chien .	1.00	1.41	0.520	445	372	71
Betelgeuse (α Orion) .	1.00	1.41	0.484	411	370	»
Achernar (α Éridan) .	1.09	1.50	0.441	»	»	»
Aldebaran (α Taureau)	1.10	1.50	»	220	222	36
β Centaure	1.17	1.58	0.399	»	»	»
α Croix du Sud. . . .	1.20	1.60	0.377	»	»	»
Antarès (α Scorpion) .	1.20	1.60	0.404	»	»	»
Ataïr (α Aigle)	1.28	1.69	0.350	450	»	40
L'Épi (α Vierge) . . .	1.38	1.79	0.309	310	»	49
Fomalhaut (α Poissons)	1.54	1.95	0.262	»	»	»
β Croix du Sud. . . .	1.57	1.98	0.255	»	»	»
Régulus (α Lion). . .	1.60	2.00	»	»	»	34
Pollux (β Gémeaux) .	1.60	2.00	»	»	»	30

Voici encore, d'après Steinheil et sir J. Herschel, les intensités lumineuses des étoiles types de chaque grandeur :

	Steinheil.	J. Herschel.
Première grandeur	1819 ou 1000	1000
2e —	642 — 353	344
3e —	227 — 125	172
4e —	80 — 44	102
5e —	28 — 15	68
6e —	10 — 6	48

§ 3. NOMBRE DES ÉTOILES DES DIVERS ORDRES DE GRANDEUR.

A mesure qu'on descend l'échelle des intensités ou des grandeurs, le nombre des étoiles contenues dans chaque classe va en croissant rapidement. Nous avons noté seulement 21 étoiles de première grandeur; on évalue à 65 le nombre d'étoiles de tout le ciel comprises dans la seconde; à 200 environ, celles de la troisième; à 425, le nombre des étoiles de quatrième grandeur; à 1100, celles de cinquième, et à 3200, celles de sixième grandeur. En faisant la somme de tous ces nombres, on trouve un peu plus de 5000 étoiles pour les six premières grandeurs, comprenant à peu près toutes celles qu'on peut apercevoir à l'œil nu.

La petitesse de ce nombre étonne presque toujours les personnes qui n'ont point cherché à se rendre un compte exact de la quantité d'étoiles qui brillent sur la voûte céleste pendant les plus belles nuits. A l'aspect de cette multitude de points étincelants qui parsèment le ciel, qui ne se sent disposé à croire qu'ils sont innombrables, qu'ils se comptent, sinon par millions, du moins par centaines de mille? C'est là cependant une véritable illusion. Tous les observateurs qui se sont donné la peine de faire un dénombrement exact des étoiles perceptibles à l'œil nu, ont compté au maximum, et en moyenne, 3000 étoiles dans toute la partie de la voûte céleste qu'on peut apercevoir au même instant. Or cette portion n'est jamais que la moitié du ciel entier. Sans entreprendre une vérification aussi laborieuse, on peut s'assurer à peu près de l'exactitude de l'évaluation dont il s'agit, en se bornant à compter les étoiles qu'on parvient à distinguer à l'œil nu, dans une région limitée du ciel, par exemple dans l'un des trapèzes formés par les étoiles principales d'Orion, du Lion, de Pégase ou de la Grande-Ourse. Nous donnons ici, dans une série de

tableaux qui nous serviront plus tard à reconnaître les constellations célestes (voy. pl. XXXIV à XXXIX), le ciel étoilé tout entier, avec les étoiles des six premiers ordres de grandeur. On pourra, à l'aide de ces vues du ciel, faire la vérification dont nous venons de parler.

Argelander a publié un catalogue exact des étoiles visibles à l'œil nu, sur l'horizon de Berlin, pendant le cours d'une année. Ce catalogue comprend 3256 étoiles[1] dont voici la distribution selon l'ordre des grandeurs :

1re grandeur	14
2e —	51
3e —	153
4e —	325
5e —	810
6e —	1871

Il y a en outre 13 étoiles variables, 15 amas et 4 nébuleuses. D'après Humboldt, il y a 4146 étoiles visibles sur l'horizon de Paris, dans tout le cours de l'année, et, comme ce nombre va croissant à mesure qu'on s'approche de l'équateur, c'est-à-dire à mesure que le double mouvement de la Terre permet de découvrir, en une année, une portion plus étendue du ciel, on trouve déjà 4638 étoiles visibles à l'œil nu, sur l'horizon d'Alexandrie (basse Égypte). L'évaluation d'Argelander étendue au ciel entier donnerait donc un nombre approché de 5000 étoiles. Mais un nouveau recensement des étoiles visibles à l'œil nu a été effectué, depuis Argelander, par un savant dont la vue pénétrante dépasse certainement la moyenne des vues ordinaires[1]. M. E. Heis, l'auteur de ce tra-

1. « Quant à ma vue, dit M. Heis, elle est perçante et bonne : les étoiles ne m'apparaissent pas, comme beaucoup d'observateurs l'ont rapporté, entourées de rayons, mais comme des points lumineux. Je distingue sans difficulté des étoiles très-voisines. Je vois facilement doubles σ du Capricorne et ω du Scorpion ; ε de la Lyre m'apparaît double quand le ciel est serein. Outre les six étoiles généralement visibles dans les Pléiades, j'y vois les étoiles 28, 26, 18 de Flamsteed, et 1170 B. A. C. »



LE CIEL DE L'HORIZON DE PARIS

Côté Sud, vu à Minuit le 21 Décembre (Solst. d'Hiver)

E. Guillemin et Ph. Benoist del. *Imp. Fraillery à Paris*

vail, y a consacré 27 années et a obtenu le résultat que nous consignons ici :

	NOMBRE DES ÉTOILES DE CHAQUE GRANDEUR					
	1re	2e	3e	4e	5e	6e
Constellations boréales.	»	12	32	44	218	962
— moyennes.	7	17	43	137	306	1645
— australes	6	19	77	132	330	1367
Totaux.	13	48	152	313	854	3974

En tout, 5354 étoiles auxquelles il faut ajouter 41 étoiles variables, 19 amas d'étoiles et 7 nébuleuses, également visibles à l'œil nu, ce qui fait, en définitive, un nombre de 5421 objets célestes distincts visibles sur l'horizon de Münster, qui est à peu près celui de Berlin. En comparant les nombres du Dr Heis avec ceux d'Argelander, on voit qu'ils sont à peu près les mêmes, comme cela devait être, pour les cinq premières grandeurs ; c'est en arrivant à la dernière que la différence devient tout à coup considérable, puisqu'elle s'élève à 2103 étoiles. Ce sont principalement des étoiles comprises entre la 6e et la 7e grandeur.

En ne considérant que l'hémisphère céleste boréal, M. Heis trouve 3968 étoiles, de sorte que, en supposant qu'il y en eût un pareil nombre dans l'hémisphère austral, on aurait 7936 ou, en nombre rond, 8000 étoiles visibles à l'œil nu dans le ciel entier. Mais cette hypothèse de l'égalité des deux hémisphères sous le rapport de leur richesse sidérale ne paraît point exacte. Le Dr Gould a recensé les étoiles visibles à l'œil nu du ciel austral, et le catalogue qu'il a publié sous le nom d'*Uranometria argentina* ne renferme pas moins de 6400 étoiles des six à sept premiers ordres de grandeur entre l'équateur et le pôle sud. Il évalue à 11000 le nombre total

pour les deux hémisphères. Le premier de ces nombres, ajouté à celui du Dr Heis, ferait en effet 10368 étoiles. Il reste à savoir si cette supériorité du ciel austral tient à la pureté de l'atmosphère de Cordoba, où le catalogue a été dressé, ou à une densité spéciale aux régions célestes explorées.

Quoi qu'il en soit, l'ancienne évaluation qui donnait un nombre maximum compris entre 5000 et 6000 étoiles environ pour le ciel entier doit être rectifiée : c'est de 10 000 à 11 000 étoiles qu'il faut dire. Mais il ne faut pas oublier qu'il s'agit là des vues de personnes habituées aux observations astronomiques et effectuant une telle révision par les nuits les plus pures. Quand l'atmosphère est éclairée par la Lune, par le crépuscule, ou, comme il arrive dans les grands centres de population, par l'illumination des maisons et des rues, les dernières grandeurs s'effacent et le nombre des étoiles visibles est beaucoup plus limité[1]. Du reste, plus la scintillation est vive, plus il est facile de distinguer les très-faibles étoiles.



Fig. 259. Un coin de la constellation des Gémeaux vu à l'œil nu.

Un mot maintenant du nombre des étoiles qu'on ne peut

1. Sans l'illumination atmosphérique, les étoiles seraient visibles en plein jour, ainsi que cela doit arriver à la surface de la Lune, dont l'atmosphère, si elle existe, est d'une rareté extrême. La visibilité des étoiles en plein jour, à l'aide des télescopes, constatée pour la première fois en 1638 par Morin, a eu pour effet d'accroître considérablement la possibilité et le nombre des observations astronomiques : cette visibilité s'explique fort bien, ainsi qu'Arago l'a démontré, par l'affaiblissement de la lumière des particules atmosphériques résultant du grossissement lui-même, et par l'accroissement d'intensité du point lumineux provenant de la concentration de toute la lumière que reçoit l'objectif. A l'œil nu, l'éclat de l'étoile est éteint par celui du champ atmosphérique qui l'entoure ; dans une lunette, l'image de l'étoile prédomine assez sur celle de l'atmosphère pour être perceptible. Pour donner une idée de cette puissance des instruments d'optique, rappelons que divers astronomes, Struve, Wrangel, Encke, ont observé, en plein jour, l'étoile de 9e grandeur qui est un satellite de la polaire. Quant à la possibilité de voir de jour les étoiles les plus brillantes sans lunettes, elle est attestée par nombre

apercevoir sans le secours du télescope. Là, nous allons retrouver ces nombres prodigieux de points lumineux que notre imagination nous fait voir, à tort, à la vue simple.

Selon l'illustre directeur de l'Observatoire de Bonn, Arge-



Fig. 260. Un coin de la constellation des Gémeaux vu au télescope. Reproduction, sur une petite échelle, d'une des cartes de l'Atlas écliptique dressé par J. Chacornac.

lander, la septième grandeur comprend à peu près 13 000 étoiles, la huitième 40 000, la neuvième enfin 142 000. Les évaluations de W. Struve portent à plus de 20 millions le nombre total des étoiles visibles dans le ciel entier à l'aide du télescope de 20 pieds construit par William Herschel. Mais, sans aucun doute, ces nombres approximatifs sont bien au-

de témoignages, depuis Aristote jusqu'à de Saussure ; mais des observateurs comme Humboldt n'ont pu réussir. Cela n'est possible d'ailleurs qu'au fond des puits de mines, ou sur le sommet des très-hautes montagnes.

dessous de leur valeur réelle[1]. On verra d'ailleurs plus loin que la richesse en étoiles des diverses parties du ciel est fort inégale. La grande zone brillante connue sous le nom de Voie Lactée en contient à elle seule, suivant Herschel, dix-huit millions. Rien n'est plus curieux que d'examiner, d'abord à l'œil nu, puis à l'aide d'une lunette, un même champ de la surface du ciel. Là, où l'œil distingue à peine quelques rares étoiles, le télescope en montre successivement des milliers. Les deux dessins ci-dessus (fig. 259 et 260) permettront à ceux de nos lecteurs qui n'ont pas en leur possession de lunette un peu puissante, de juger de la surprise qu'on éprouve à faire cette expérience[2]. Ces dessins représentent le même coin de la constellation des Gémeaux (dans un carré de 5 degrés de côté). L'œil nu permet d'y compter sept étoiles. Or, le même espace céleste, vu à l'aide d'un télescope de 27 centimètres d'ouverture, ne renferme pas moins de 3205 étoiles, depuis la troisième jusqu'à la treizième grandeur. C'est un véritable fourmillement de points lumineux. Que serait-ce donc si, appliquant à la même région les instruments beaucoup plus puissants encore, dont la science peut actuellement disposer, l'œil y découvrait à des profondeurs pour ainsi dire infinies toutes les étoiles des ordres inférieurs?

1. M. Chacornac considère cette évaluation comme bien inférieure à celle des étoiles comprises entre la première et la treizième grandeur : « Pour ma part, nous écrivait-il, d'après les jauges de sir W. Herschel et celle des cartes écliptiques, j'évalue à 77 millions le nombre des étoiles comprises dans les treize premiers ordres de grandeur, si l'on prend la moyenne indiquée dans la préface du catalogue des zones de Bessel réduites par Weiss. » Que serait-ce, si l'on pouvait joindre à ces énumérations, déjà si prodigieuses, toutes les étoiles qui forment les amas stellaires et les milliers de nébuleuses résolubles aujourd'hui connues !

2. Pourvu, toutefois, qu'ils n'oublient pas que plus l'instrument employé est puissant, et augmente le nombre des étoiles, plus le grossissement en un mot est considérable, plus aussi se trouve diminué le champ ou l'espace céleste embrassé à la fois.

II

DISTANCES DES ÉTOILES

§ 1. ANCIENNES CONJECTURES SUR LES DISTANCES DES ÉTOILES. PREMIÈRES TENTATIVES DE MESURE.

Les anciens n'avaient et ne pouvaient avoir aucune notion un peu précise sur la distance des étoiles. Et en effet, dans l'hypothèse de l'immobilité de la Terre au centre du monde, une seule méthode eût été à leur disposition pour déterminer cette distance, celle qui consiste à prendre pour base du triangle aboutissant à une étoile quelconque, une distance terrestre, par exemple le diamètre de notre globe. C'est la méthode qui leur réussit pour trouver approximativement la distance de la Lune ; mais l'imperfection des moyens de mesure ne leur permit déjà plus de l'appliquer à la distance du Soleil, et elle devenait illusoire pour celle des étoiles.

Quand Copernic eut découvert et démontré le mouvement annuel de la Terre, la question changea de face. La base du triangle se trouva agrandie dans le rapport du rayon de la Terre au rayon de son orbite. L'immensité du déplacement de l'observateur, passant d'un point de la courbe au point diamétralement opposé, devait produire, dans les positions apparentes des étoiles, soit en longitude, soit en latitude, des différences qu'il ne s'agissait plus que de mesurer avec pré-

cision. Le problème avait à cette époque un intérêt d'autant plus grand, qu'une solution favorable eût été un témoignage de plus de la réalité du mouvement de translation de la Terre et de la vérité des idées astronomiques nouvelles.

Malheureusement toutes les mesures prises ne donnèrent d'abord aucun résultat. Copernic trouva une parallaxe inférieure aux erreurs des observations de son temps. Rothman, Hooke et plus tard J. Cassini trouvèrent au contraire des résultats évidemment exagérés. C'est que les observations se trouvaient alors influencées par des mouvements apparents encore inconnus, tels que ceux dus à l'aberration de la lumière et à la nutation : cette remarque s'applique aux tentatives de Picard, d'Horrebow, de Flamsteed. Plusieurs astronomes comparèrent les positions d'étoiles très-voisines et d'inégal éclat, mais sans résultat, parce qu'ils étaient tombés sur des étoiles formant systèmes, et par suite à peu près également distantes du Soleil.

Les mesures directes furent donc infructueuses, et l'on aborda le problème par d'autres voies. Il faut citer en premier lieu une conjecture de Képler, qui, ayant trouvé que la distance de Saturne est égale à environ 2000 rayons du globe du Soleil, s'imagina qu'une loi d'harmonie céleste devait pareillement donner 2000 rayons de l'orbite de Saturne pour la distance des étoiles fixes, soit 4 millions de rayons solaires[1]. Huygens, qui avait trouvé insensible la parallaxe de Mizar (ζ Grande-Ourse) en comparant cette étoile avec sa voisine Alcor, employa une autre méthode pour évaluer celle de Sirius; il compara photométriquement l'éclat de Sirius à la

1. C'est évidemment là une rêverie du grand astronome. Il est curieux néanmoins de reconnaître qu'en appliquant à Neptune le calcul que Képler avait fait pour Saturne, on tombe sur un nombre qui ne diffère pas beaucoup de la distance des étoiles de première grandeur les plus rapprochées de nous. Cette dernière distance, évaluée en rayons de l'orbite de Neptune, donne à peu près 6700; or, la distance de Neptune équivaut à 6400 rayons solaires.

lumière du Soleil, et en conclut que sa distance, qu'on sait aujourd'hui beaucoup plus considérable, égale 28 000 rayons de l'orbite terrestre. Chéseaux trouva de la même façon 20 000 rayons. Lambert, Mitchell, par des procédés semblables appliqués à Mars et à Saturne, dont ils avaient comparé l'éclat à Sirius, obtinrent des nombres différant peu de ceux qu'on a eus depuis directement, et correspondant à des parallaxes de 1″ ou de 0″.5 au maximum; Lambert pensait que les étoiles de première grandeur sont plus éloignées du Soleil que 425 000 fois le rayon de l'orbite de la Terre.

En 1781, Herschel s'attaqua au problème si difficile, si délicat, de la détermination des distances stellaires, par la méthode différentielle, celle qui consiste à comparer les variations annuelles de position de deux étoiles en apparence très-voisines, méthode déjà indiquée par Galilée, Gregory et Huygens, et appliquée pour la première fois, mais sans succès, par le Dr Long. Herschel trouva une parallaxe insensible.

Ainsi, malgré les progrès de l'astronomie théorique et pratique, qui du temps de Bradley permettaient déjà d'observer avec une précision de 1″ d'arc, les distances des étoiles échappaient aux tentatives de mesure. Non-seulement le rayon de notre globe s'évanouissait comme un point mathématique devant l'immensité de ces distances, mais la nouvelle unité choisie, près de 24 000 fois aussi grande que ce rayon, paraissait nulle elle-même en comparaison de la longueur des lignes joignant notre Soleil aux étoiles qu'on pouvait supposer les plus rapprochées.

Dans cette première période des recherches relatives aux parallaxes stellaires, on n'obtint donc qu'une limite inférieure de la distance : aucune étoile n'était moins éloignée que de 206 165 fois (parall. 1″) la distance du Soleil à la Terre. Il restait à trouver une limite supérieure, et cette solution était réservée à notre siècle.

§ 2. PARALLAXES MESURÉES. — DISTANCES DE QUELQUES ÉTOILES.

On s'était d'abord occupé, comme il semblait naturel, des étoiles de première grandeur : Wéga, Sirius, Aldebaran, Procyon, les plus brillantes étoiles de notre ciel, devaient être les plus voisines. Or, la première détermination positive eut, au contraire, pour objet une étoile à peine visible à l'œil nu, une étoile de 6e grandeur de la constellation du Cygne, marquée dans les catalogues célestes du n° 61, et aujourd'hui célèbre dans la science. C'est à l'illustre Bessel (1837-1840) que revient l'honneur de cette importante détermination.

La parallaxe de la 61e du Cygne dépasse un peu le tiers d'une seconde (0″.374). Cela revient à dire que la distance de cette étoile au Soleil est égale à 551 000 fois le rayon de l'orbite terrestre, à 81 000 milliards de kilomètres. Comment se représenter une telle distance, quelle imagination serait assez puissante pour se la figurer? En vain l'esprit entasse ligne sur ligne, nombre sur nombre, jamais il n'arrive à combler l'immensité de l'abîme que mesure cette simple fraction décimale 0″.374, que représentent les 14 chiffres qui en donnent la traduction en kilomètres. Nous n'avons qu'un moyen de nous faire une idée approchée, non de telles distances elles-mêmes, mais de leur effrayante grandeur; ce moyen, que nous avons employé déjà bien des fois, consiste à associer au sens de la vue celui de la perception du temps. Prenons donc pour unité l'espace que franchit la lumière, non plus en 1 seconde, ni en 1 heure, ni même en 1 jour, mais en 1 année, et demandons-nous depuis quel temps est en route le rayon lumineux qui frappe notre rétine, lorsque nous jetons le regard sur la 61e étoile du Cygne. Or, un calcul simple donne pour ce temps 8 années et 7 mois. Après le premier jour de son voyage, l'onde lumineuse avait déjà parcouru six fois

environ la distance du Soleil à Neptune : elle n'était cependant encore qu'à la trois-millième partie du chemin, qui exige 3140 jours, 3140 étapes pareilles, pour être complétement terminé.

La seconde étoile dont la parallaxe ait été mesurée et la distance calculée, est Alpha (α), la plus brillante de la constellation australe du Centaure. Sa parallaxe approche de 1″ (0″.913 d'après Henderson et Maclear [1832, 1839]; 0″.88 d'après Mœsta [1867]). C'est la plus grande des parallaxes jusqu'ici déterminées : en d'autres termes, Alpha du Centaure est l'étoile la plus voisine du système solaire.

NOMS DES ÉTOILES.	Parallaxes mesurées.	DISTANCES ÉVALUÉES en rayons de l'orbite terrestre.	en milliards de kilom.	en années de la lumière.	AUTORITÉS.
α Centaure	0″.913	225 970	33 400	ans 3.5.	Henderson et Mac-Lear.
61ᵉ Cygne	0 .374	550 920	82 000	8.7	Bessel. Peters.
α Lyre	0 .155	1 332 200	197 850	21.0	O. Struve.
Sirius.	0 .150	1 375 100	202 000	21.3	Henderson. Peters.
ι Grande-Ourse. . .	0 .133	1 550 000	229 500	24.4	Peters.
Arcturus	0 .127	1 628 000	241 000	25.5	Id.
Polaire.	0 .106	1 946 000	288 000	30.6	Id.
1830ᵉ Groombridge[1]	0 .226	912 600	135 000	14.4	Id.
	0 .090	2 292 000	340 350	35.5	Brünnow.
	0 .034	6 080 000	902 900	96.0	O. Struve.
Chèvre	0 .046	4 484 000	663 000	70.5	Peters.
σ Dragon.	0 .250	825 000	120 500	12.8	Brünnow.
85 Pégase	0 .050	4 125 000	612 500	63.9	Id.
3077 Bradley. . . .	0 .070	2 946 000	437 500	45.6	Id.

Les astronomes se sont attaqués à d'autres étoiles de première grandeur : Sirius, la Chèvre, Wéga de la Lyre, Arc-

1. Nous donnons ici trois valeurs de la parallaxe de cette étoile, valeurs bien différentes les unes des autres, comme on voit, parce que nous ne sachions pas que la discussion les ait pu ramener à une valeur moyenne. Au contraire,

turus ont été l'objet de leurs recherches, et ils ont réussi à déterminer approximativement leurs distances. Il faut citer aussi la *Polaire*, qui n'est que de seconde grandeur, et une petite étoile de 7e grandeur, marquée du nº 1830 dans le catalogue de Groombridge, que la rapidité de son mouvement propre avait désignée comme probablement assez voisine de notre système, et qui cependant paraît avoir une très-petite parallaxe. Nous donnons ci-dessus le tableau des principales parallaxes, des distances des étoiles mesurées en rayons de l'orbite terrestre, calculées en milliards de kilomètres, et enfin évaluées au moyen du temps que la lumière met à venir de chaque étoile au Soleil ou à la Terre. En consultant ce tableau, on voit qu'il ne faut pas moins de trois années à la lumière pour franchir la distance qui nous sépare de l'étoile la plus proche de nous. De Wéga, de l'étincelant Sirius, la lumière met plus de vingt ans à nous parvenir; de la Polaire, il lui faut près d'un tiers de siècle. Enfin, pour traverser l'espace qui sépare la Chèvre du monde où nous vivons, ou si l'on veut, pour franchir 165 800 milliards de lieues, c'est 70 ans et demi qu'il faut à ce courrier si étonnamment rapide : la vie tout entière d'un homme ! Voulons-nous nous faire, à

les parallaxes des sept étoiles qui précèdent et aussi celle de la Chèvre sont, pour les quatre premières et la Polaire, les moyennes déduites de la discussion et de la comparaison des mesures effectuées par divers astronomes, pour la Chèvre, Arcturus et ι Grande-Ourse, celles trouvées par Peters qui les a seul calculées. Les trois dernières parallaxes indiquées ont été nouvellement déterminées par M. Brünnow. Les nombres du tableau, quoique exprimés en millièmes de seconde, ne sont pas pour cela calculés avec cette précision; il faudrait, à chaque détermination, joindre l'erreur probable, qui atteint assez souvent le chiffre des dixièmes. Il y a aussi à faire une distinction entre ce qu'on nomme les parallaxes *absolues*, trouvées par l'étude des variations en latitude, et les parallaxes *relatives* obtenues par la comparaison des positions de l'étoile avec celles d'une étoile voisine, que l'on considère provisoirement comme située à une distance infinie. Il est aisé de comprendre que ces dernières parallaxes ne donnent qu'une limite inférieure des distances. Nous reviendrons sur ces points dans la *Troisième partie* du Ciel.

un autre point de vue, une idée de ces distances? Supposons-nous placé à l'une des extrémités de la ligne qui joint notre Soleil à l'étoile Alpha du Centaure. De ce point, le rayon tout entier de l'orbite terrestre serait caché par un fil d'un millimètre de diamètre, reculé à une distance de deux cents mètres de notre œil; autrement dit, une ligne de trente-sept millions de lieues, vue de face à cette distance, n'apparaît plus que comme un point imperceptible.

§ 3. DISTANCES DES ÉTOILES DES DIVERS ORDRES DE GRANDEUR.

En nous bornant aux nombres qui précèdent, nous voyons que c'est une étoile de première grandeur qui marque la limite inférieure des distances stellaires. Quatre autres étoiles du même ordre s'enfoncent à des distances beaucoup plus grandes dans l'espace, 6, 7 et même 20 fois aussi considérables. On pourrait en déduire une moyenne pour la distance des étoiles de cette grandeur, et l'on trouverait près de 3 millions de rayons de l'orbite terrestre correspondant à la parallaxe 0″.114; en laissant de côté la Chèvre comme ayant une distance exceptionnellement grande, on aurait encore plus de 1 million de rayons, avec la parallaxe moyenne 0″.182. Mais on comprend que le nombre des données est trop petit pour qu'on puisse regarder ces résultats même comme approchés.

Il n'est pas douteux que, s'il était possible de multiplier ces mesures délicates, en les appliquant à des étoiles de même grandeur apparente, on arriverait à déterminer les moyennes distances des étoiles des divers ordres. Mais, aux mesures directes, encore trop peu nombreuses et dès lors insuffisantes, on a suppléé par des considérations spéculatives, qui ont un haut degré de probabilité.

W. Herschel est entré le premier dans cette voie; dans ses

recherches, il s'est appuyé sur la loi physique de la décroissance de l'intensité lumineuse proportionnelle aux carrés des distances, loi d'après laquelle une étoile qui s'éloignerait aux distances successives 2, 3, 4, 5.... deviendrait 4, 9, 16, 25.... fois moins brillante. Considérant en outre la totalité des étoiles visibles à l'œil nu, ou perceptibles à l'aide des télescopes, comme étant uniformément réparties dans l'espace sous le rapport de l'éclat intrinsèque, il en tira la conséquence qu'en moyenne les étoiles des divers ordres de grandeur ne sont inégales en éclat que par le fait des inégalités de leurs distances à notre système : du rapport entre les intensités lumineuses de deux étoiles d'un ordre quelconque, il put donc déduire le rapport de leurs distances. Prenant enfin pour unité la moyenne distance des étoiles de première grandeur, et se basant sur les expériences de photométrie comparatives qu'il fit sur un grand nombre d'étoiles, depuis Sirius, Wéga et la Chèvre, jusqu'aux dernières étoiles visibles à l'œil nu, l'illustre astronome formula ainsi ses vues sur les distances stellaires :

« Les étoiles de 6e grandeur sont 12 fois plus éloignées que les étoiles de première grandeur : en d'autres termes, une étoile de première grandeur, Arcturus si l'on veut, reculée dans l'espace à 12 fois sa distance actuelle, serait encore visible à l'œil nu. Telle est la portée de la vue simple.

« Le télescope de 20 pieds (employé par Herschel, pour ses jauges célestes) pénètre dans l'espace à une distance 61 fois aussi grande que l'œil nu ; il atteint des étoiles 734 fois aussi éloignées que les étoiles de première grandeur. Avec la vue de front « front-view » le même instrument a une pénétration égale à 75, et montre des étoiles distantes de 900 unités.

« Enfin, le grand télescope de 40 pieds (celui à l'aide duquel il découvrit les 6e et 7e satellites de Saturne) a un pouvoir

égal à 195, c'est-à-dire pénètre dans l'espace jusqu'à une distance de 2300 unités[1]. »

Des recherches analogues ont été entreprises par W. Struve. Voici les résultats qu'a obtenus ce savant astronome, en appliquant les principes posés plus haut à l'examen des dénombrements d'étoiles de diverses grandeurs provenant soit des jauges d'Herschel, soit des catalogues d'Argelander et de Bessel. Ayant fait la remarque que les nombres auxquels il parvient sont moins forts que ceux d'Herschel, et que ceux-ci sont basés sur l'hypothèse que la lumière des étoiles ne subit aucune extinction en traversant l'espace, Struve en conclut que cette hypothèse n'est pas exacte; il fut ainsi conduit à admettre, conformément aux vues de Chéseaux et d'Olbers, qu'une telle perte de lumière existe réellement. En un mot, l'intensité des lumières stellaires décroît plus rapidement que ne l'indique la loi du rapport inverse des carrés des distances. Struve parvient alors, en se basant uniquement sur l'observation, sans employer, comme il le dit avec raison, aucune hypothèse arbitraire, à établir les distances moyennes relatives des étoiles des divers ordres d'éclat. Il formule ainsi lui-même les principales conclusions de son travail :

« Les dernières étoiles visibles à l'œil nu (catal. d'Argelander) sont à une distance qui est presque 9 fois (8.8726) la distance moyenne des étoiles de première grandeur ;

« Les dernières étoiles de 9e grandeur, observées par Bessel dans ses zones, sont à la distance de 37.73 unités, ou 4.25 fois aussi éloignées que les dernières étoiles visibles à l'œil nu ;

« Enfin, les plus petites étoiles qu'Herschel a observées à

1. Ces nombres supposent que la lumière des étoiles ne subit aucune extinction dans son passage au travers des espaces célestes. Les recherches de W. Struve, dont nous parlons plus bas, montrent qu'une telle extinction existe en effet, qu'elle affaiblit l'éclat de 0.01 pour une distance égale à celle des étoiles de 1re grandeur, de 0.08 pour celles de 6e, de 0.88 pour les dernières étoiles visibles dans le télescope de 20 pieds.

l'aide de son télescope de 20 pieds sont à une distance de 227.8 unités, ou 25.67 fois plus éloignées que les dernières étoiles visibles à l'œil nu. »

Dans tout cela, il ne s'agissait que des rapports entre les distances moyennes des étoiles de diverses grandeurs : il restait à exprimer chacune de ces distances en unités connues, mesurées, par exemple en rayons de l'orbite terrestre. C'est ce que les mesures récemment effectuées des parallaxes ont permis de faire en traduisant les rapports dont on vient de parler en grandeurs réelles. Une étude comparative des parallaxes de 35 étoiles, faite en 1846 par Peters, a amené cet astronome à la conclusion suivante :

« La parallaxe moyenne des étoiles de 2e grandeur est égale à 0″.116. »

Introduisant ce nombre dans ses rapports, W. Struve est arrivé en définitive aux résultats consignés dans le tableau ci-dessous.

GRANDEURS DES ÉTOILES.	Parallaxes.	DISTANCES		
		relatives.	en rayons de l'orbite terrestre.	en années de la lumière.
Première	0″.209	1.0000	986 000	15.5
1.5	0 .166	1.2594	1 246 000	19.6
2	0 .116	1.8031	1 778 000	28.0
2.5	0 .098	2.1326	2 111 000	33.3
3	0 .076	2.7639	2 725 000	43.0
3.5	0 .065	3.2154	3 151 000	49.7
4	0 .054	3.9057	3 850 000	60.7
4.5	0 .047	4.4467	4 375 000	69.0
5	0 .037	5.4545	5 378 000	84.8
5.5	0 .034	6.1471	6 121 000	96.6
6	0 .027	7.7258	7 616 000	120.1
6.5	0 .024	8.8370	8 746 000	137.9
7.5	0 .014	14.4450	14 230 000	224.5
8.5	0 .008	24.8560	24 490 000	386.3
9.5	0 .006	37.7510	37 200 000	586.7
H + 0.5	0 .00092	227.3200	224 500 000	3541.0

Devant l'immensité des nombres qui expriment les distances des plus petites étoiles, il ne faut pas oublier que ce sont encore là des limites inférieures, que les calculs sont basés sur des mesures de parallaxes plutôt trop grandes, c'est-à-dire sur des distances trop petites, et enfin que le tableau de Struve ne va guère au delà des étoiles visibles dans le télescope de 20 pieds d'Herschel. On n'atteint donc pas encore ainsi les limites de la portion de l'Univers sidéral visible. Déjà cependant se montrent à nous des étoiles si éloignées, que la lumière qui nous en parvient est en route depuis plus de 3500 ans!

§ 4. LES ÉTOILES SONT DES SOLEILS.

L'étoile la plus voisine est au moins deux cent mille fois aussi éloignée de notre monde solaire, que la Terre l'est du Soleil; sa parallaxe ne vaut pas 1″. Que signifie ce dernier nombre? Que le rayon de l'orbite terrestre, vu de cette distance, sous-tendrait à peine un angle égal à la 2000e partie du diamètre solaire. Comment nous apparaîtrait donc ce dernier diamètre lui-même, reculé dans l'espace jusqu'à la distance d'Alpha du Centaure? Moins grand qu'un centième de seconde (0″.00855). Or, on va voir que les étoiles les plus brillantes n'ont pas un diamètre apparent de beaucoup supérieur à cette valeur cependant si petite.

Les premières évaluations qu'on ait faites des diamètres des étoiles étaient grandement exagérées. Tycho, Képler et les astronomes qui observaient à l'œil nu, donnaient à Sirius de 2′ à 4′ de diamètre. Quand les lunettes eurent permis de dépouiller les images des étoiles des diamètres factices causés par les faux rayons divergents qui les environnent, les évaluations se trouvèrent considérablement réduites. Gassendi réduisit le diamètre de Sirius à 10″, Hévélius à 6″ et J. Cas-

sini à 5″[1] : ce sont encore des nombres beaucoup trop grands. W. Herschel en 1781 étudia Wéga et Arcturus à ce point de vue, et il crut pouvoir assigner à la première étoile un diamètre de 0″.36, à la deuxième de 0″.1 ou au plus de 0″.2.

Voyons, dans l'hypothèse où ces derniers nombres seraient exacts, à quelles dimensions réelles correspondraient de tels diamètres. De Wéga, qui a une parallaxe de 0″.155, le rayon de l'orbite terrestre aurait précisément 0″.155 comme dimension apparente ; d'Arcturus, le même rayon serait égal à 0″.127. Des dimensions de 0″.36 et 0″.2 équivaudraient donc, comme un calcul très-simple le montre, à 2 fois $\frac{1}{3}$ et 1 fois $\frac{1}{2}$ le rayon de l'orbite de la Terre. Les étoiles dont il est question auraient ainsi, l'une plus de 80 millions de lieues, l'autre 60 millions de lieues de diamètre; le volume de Wéga serait 12500000 fois, et celui d'Arcturus 5270000 fois le volume du Soleil. De telles dimensions, on va le voir, sont fort improbables, et les mesures d'Herschel sont encore fort exagérées.

Le directeur de l'Observatoire de Marseille, M. Stéphan, a déterminé récemment, à l'aide d'une méthode basée sur l'étude des franges d'interférence, une limite supérieure des diamètres stellaires. Appliquée à Sirius, à d'autres étoiles de la 1re à la 4e grandeur, cette méthode a fourni à notre savant compatriote le nombre 0″.158, mais comme un maximum ; ses expériences prouvent en effet que le diamètre apparent n'est qu'une très-faible fraction de ce nombre. En prenant le dixième seulement, on aurait encore plus de 3 millions de kilomètres pour le diamètre de Sirius ; c'est 2 fois $\frac{1}{4}$ celui du Soleil, et le volume de l'étoile dépasserait ainsi 11 fois le volume du globe solaire, résultat qui n'a plus rien que de fort admissible.

1. Ce dernier résultat a été obtenu en comparant, avec la même lunette, le disque de Jupiter à celui de Sirius, que Cassini trouva dix fois plus petit (voy. les *Éléments d'astronomie*). Mais les disques des étoiles dans les lunettes sont des cercles fictifs, d'autant plus petits que l'instrument est plus puissant.

Les mesures directes des diamètres stellaires faisant défaut[1], on a eu recours aux comparaisons photométriques. Entrons à cet égard dans quelques détails.

L'étoile α du Centaure a été comparée, sous le rapport de l'intensité lumineuse, à la pleine Lune, par sir J. Herschel, qui a trouvé que sa lumière n'est que la 27 408e partie de celle du disque lunaire. De son côté, Wollaston avait trouvé que le Soleil équivaut à 801 072 pleines lunes. D'où la conséquence qu'il faudrait 21 955 millions d'étoiles pareilles à α du Centaure pour égaler la lumière solaire. Il ne faudrait que 5418 millions d'étoiles aussi brillantes que Sirius. Maintenant, le Soleil reculé à la distance de α du Centaure, perdant de son éclat dans le rapport du carré des distances, n'aurait plus que les 43 centièmes de l'intensité de cette même étoile. Ce serait encore une étoile de première grandeur, moins brillante que Betelgeuse, à peu près égale à Wéga, à Antarès.

Mais, si le Soleil était reculé jusqu'à la distance de Sirius, ou de Wéga (à peu près également éloignées), sa lumière ne serait plus que la 350e partie de celle de Sirius, et vaudrait à peine la moitié de l'intensité d'une étoile de 6e grandeur. Le Soleil, à cette distance, ne serait plus visible à l'œil nu.

Faisons maintenant une hypothèse. Admettons que l'éclat intrinsèque du Soleil et celui des étoiles qu'on vient de lui comparer soient les mêmes, et reprenons en sens inverse les rapports trouvés entre leurs lumières à égalité de distance :

α du Centaure vaut	. . .	2.326	fois le Soleil.
Sirius —	. . .	349.13	—

Dans cette hypothèse, il est clair que l'éclat varie en raison

1. Une autre preuve de l'extrême petitesse de ces diamètres est encore tirée des occultations d'étoiles par la Lune. Ces occultations, en effet, sont instantanées. Quand, par le mouvement de la Lune à travers les constellations, le disque de cet astre passe devant une étoile, l'extinction de la lumière de celle-ci, au lieu d'être graduelle comme elle devrait l'être dans l'hypothèse d'un diamètre stellaire sensible, est subite et entière.

de la surface ou des carrés des diamètres, et qu'ainsi l'on trouverait :

Pour le diamètre de α du Centaure	1.52	diamètre solaire.
Pour celui de Sirius	18.6	—

D'autres considérations font penser que l'éclat intrinsèque de Sirius dépasse celui du Soleil, et qu'ainsi son diamètre ne vaut pas 18 fois le diamètre solaire. Ce résultat s'accorde avec la limite trouvée par M. Stéphan, qui donne pour les dimensions de Sirius, au maximum 22.5 fois, et, en réduisant cette limite au dixième, 2.25 fois le diamètre du Soleil.

Si ces mesures offrent encore bien des incertitudes, il est un résultat qui n'est pas douteux, c'est que le Soleil, transporté dans l'espace, à la plus petite des distances stellaires, serait réduit à un point lumineux, et finirait par disparaître s'il était reculé à la distance de quelques-unes des étoiles de première grandeur. N'est-il donc pas de toute évidence que ces étoiles, dont les diamètres sont trop petits pour être mesurables, sont elles-mêmes des soleils, c'est-à-dire des astres brillant d'une lumière qui leur est propre? Comment serait-il possible qu'une lumière réfléchie pût, après un double trajet, un double voyage d'au moins six années, aller de notre Soleil à ces corps si prodigieusement éloignés et en revenir avec l'intensité qui caractérise les lumières stellaires? Concluons donc par l'énoncé de cette vérité, aujourd'hui rigoureusement démontrée, mais qu'avait entrevue déjà le génie des Képler, des Huygens, des Lambert, des Kant et de tant d'autres célèbres savants des derniers siècles :

Les étoiles sont des soleils.

Chacun de ces points lumineux, que la vue simple montre par milliers sur la voûte du ciel, et le télescope par millions dans les profondeurs de l'espace, brille de sa propre lumière. Chaque étoile est un monde!



LE CIEL DE L'HORIZON DE PARIS

Côté Sud, vu à Minuit le 22 Mars (Equin. du Printemps.)

E. Guillemin et Ph Benoist del — *Imp. Fraillery à Paris*

III

MOUVEMENTS PROPRES DES ÉTOILES

§ 1. DÉTERMINATION DES MOUVEMENTS PROPRES ET DES VITESSES DES ÉTOILES.

L'idée de la fixité des étoiles a longtemps dominé l'astronomie. Les anciens les croyaient réellement immobiles dans l'espace, attachées aux cieux cristallins qu'ils avaient imaginés pour rendre compte des phénomènes célestes, dont la véritable interprétation leur échappait. Les astronomes modernes, depuis Copernic, convaincus de l'immensité de la distance des étoiles par l'absence de parallaxe sensible, ont pu donner à cette fixité une signification différente, en l'attribuant naturellement à la difficulté de constater les mouvements réels de corps aussi éloignés de notre système. D'autre part, l'immobilité du Soleil, son identification avec les étoiles militaient en faveur d'une pareille immobilité de celles-ci. Entre ces deux suppositions qui semblaient également admissibles, où était la vérité? Il n'y a guère qu'un siècle et demi que la question est décidément résolue en sens contraire de l'ancienne hypothèse, et que la vieille dénomination des *fixes* n'a plus qu'une valeur relative.

Ni le Soleil, ni les étoiles ne sont immobiles dans l'espace. Tous les astres, quels qu'ils soient, sont dans un état de mou-

vement continu qui change à chaque instant leurs situations respectives. Le repos n'existe nulle part dans le ciel; le mouvement est la loi commune de l'Univers.

Halley est le premier astronome qui ait soupçonné les mouvements propres de trois étoiles, de Sirius, d'Arcturus et d'Aldébaran. Ayant comparé les positions en latitude, qu'elles avaient en 1717, avec celles que leur assignait le catalogue



Fig. 261. Mouvements propres des étoiles de la Grande-Ourse. Forme actuelle de la constellation.

Fig. 262. La Grande-Ourse dans 36 000 ans. Changements produits par les mouvements propres.

d'Hipparque pour une époque antérieure de 1847 ans (130 ans av. J. C.), ce savant constata des variations de position contraires à celles des autres étoiles, et en conclut qu'elles avaient subi des déplacements particuliers. J. Cassini, après avoir également constaté le mouvement d'Arcturus en latitude, et prouvé qu'il ne pouvait provenir d'une oscillation inconnue de l'écliptique, détermina en 1738 le mouvement d'Ataïr en longitude; et bientôt, de tels mouvements propres purent être

reconnus en grand nombre par la comparaison des positions des étoiles au moment de l'observation, avec celles indiquées dans des catalogues récents. La précision des procédés de mesure concourut avec les progrès de la théorie pour accroître le nombre des mouvements propres mesurés[1]. Les noms des astronomes Bradley, Lemonnier, Mayer, Maskelyne, Piazzi sont ceux des savants du dernier siècle qui contribuèrent le plus à mettre hors de doute la réalité de ces mouvements.

Citons maintenant quelques exemples.

La plus brillante étoile du Bouvier, Arcturus, met un siècle entier pour parcourir seulement la huitième partie du diamètre de la Lune. Alpha du Centaure, dans le même intervalle de temps, se déplace d'une quantité égale au cinquième de ce diamètre. Beaucoup d'autres étoiles se meuvent avec

1. Pour arriver à reconnaître et à mesurer avec précision des variations aussi petites, aussi lentes dans les positions des étoiles, il fallait, outre les perfectionnements apportés aux procédés de mesure depuis l'invention des lunettes, d'autres progrès non moins importants de la théorie. Les positions d'une étoile sont rapportées, comme on sait, soit à l'équateur et aux pôles de ce plan, soit au plan de l'orbite de la Terre ou écliptique et à ses pôles : l'*ascension droite* et la *déclinaison* dans le premier cas, la *longitude* et la *latitude* dans le second, sont les coordonnées relatives à ces deux modes de détermination. Or, la situation de l'axe du monde ou de l'équateur céleste est variable : la *précession* et la *nutation lunisolaire* sont des mouvements qui affectent les coordonnées des étoiles ; l'angle de l'équateur et de l'écliptique ou l'*obliquité* varie aussi et produit des changements dont il faut également tenir compte. Ce n'est pas tout : les longitudes et les latitudes des étoiles subissent des variations annuelles dues à la composition de la vitesse des ondes lumineuses et de celle de la Terre dans son orbite ; c'est le phénomène de l'*aberration*, inconnu avant Bradley. Enfin l'interposition de l'atmosphère et la *réfraction* qu'éprouvent les rayons lumineux en la traversant, nécessitent encore une autre correction dans la position apparente des étoiles. C'est après avoir tenu compte de toutes ces variations, dont quelques-unes sont fort petites, et avoir effectué les corrections nécessaires, que les astronomes sont parvenus à constater deux autres changements de position, d'une part les effets périodiques de *parallaxe* dus au mouvement annuel de la Terre et qui nous ont renseigné sur les distances de quelques étoiles, et d'autre part les *mouvements propres* dont il est question dans ce paragraphe.

plus de lenteur encore. Les mouvements propres les plus rapides sont ceux de la 61[e] du Cygne, de l'étoile 1830 Groombridge, dont nous avons vu qu'on a mesuré les distances à la Terre, et de deux étoiles du ciel austral, l'une appartenant à la constellation de l'Indien, l'autre à celle du Navire. Toutefois ces quatre astres, pour se déplacer sur la voûte étoilée de tout le diamètre lunaire, mettent encore chacun



Fig. 263. Cassiopée, état actuel. Fig. 264. Cassiopée dans 36000 ans.

plus de trois siècles, à raison d'un mouvement moyen annuel qui est respectivement de 5″,1, de 7″, de 7″,7 et de 7″,9 environ.

Voici, du reste, un tableau où nous consignons quelques-uns des mouvements propres stellaires, les plus importants, soit par leur grandeur, soit par les étoiles auxquelles ils appartiennent. Il est à remarquer que ce ne sont pas les plus brillantes étoiles qui se déplacent le plus rapidement. Comme la distance de quelques-unes est connue, on peut calculer la vitesse réelle d'après la vitesse apparente; mais en lisant ces

nombres (ceux de la dernière colonne), il ne faut pas oublier que les chemins parcourus en réalité par les étoiles sont peut-être beaucoup plus considérables que ne l'indique le calcul, la direction vraie du mouvement nous étant inconnue. Ce sont les projections de ces déplacements qu'on a mesurées, et les vitesses du tableau sont nécessairement des vitesses minima.

NOMS DES ÉTOILES.	GRANDEUR.	MOUVEMENTS PROPRES annuels.	MOUVEMENTS PROPRES en 10 000 ans.	VITESSES minima par seconde.
2151 Navire.	6	7″.871	21°.86	»
ε Indien.	6.7	7 .740	21 .50	»
1830 Groombridge . .	7	6 .974	19 .37	145.0 [1]
—	»	»	»	364.0 [1]
—	»	»	»	963.6 [1]
61ᵉ Cygne.	5	5 .123	14 .23	64.3
δ Éridan	3	4 .080	11 .33	»
μ Cassiopée.	5.6	3 .740	10 .40	»
α Centaure	1	3 .580	9 .94	18.4
Arcturus	1	2 .250	6 .25	83.2
Sirius.	1	1 .234	3 .43	38.6
ι Grande-Ourse. . . .	3	0 .746	2 .07	26.3
Chèvre	1	0 .461	1 .28	47.1
Wéga.	1	0 .364	1 .01	11.0
Aldébaran.	1	0 .185	0 .51	»
Polaire	2	0 .035	0 .10	1.5

La Terre se meut dans son orbite, rappelons-nous-le, avec une vitesse moyenne de 29ᵏ.5 par seconde. Neptune ne parcourt que 5ᵏ.4, et la plus rapide des planètes, Mercure, n'a pas une vitesse supérieure à 47 kilomètres, celle de la Chèvre. Plusieurs des étoiles dont la vitesse est connue ont donc des mouvements propres plus rapides que les mouvements planétaires. 1830ᵉ Groombridge se meut au moins cinq fois aussi vite que la Terre, Arcturus trois fois, la 61ᵉ du Cygne deux fois.

1. Les trois nombres différents correspondent aux valeurs différentes trouvées pour la parallaxe et dès lors pour la distance de cette étoile.

§ 2. MOUVEMENT PROPRE DU SOLEIL. TRANSLATION DU SYSTÈME SOLAIRE.

Si les étoiles sont des soleils, en d'autres termes si notre Soleil est une étoile, il doit avoir aussi un mouvement de translation dans l'espace ; et, s'il en est ainsi, ce mouvement de translation entre nécessairement, par sa direction et son intensité, dans les mouvements propres stellaires : supposons qu'on soit parvenu — on va voir à l'instant que cette supposition est une réalité — à déterminer cette direction et cette vitesse. Il sera possible alors de dégager, dans le mouvement propre tel qu'on vient de le constater, la partie qui n'est qu'apparente de celle qui appartient aux étoiles mêmes. Et alors, que restera-t-il à trouver pour connaître intégralement, en direction et en vitesse, les mouvements vrais des étoiles dont la distance à notre système a été calculée? un seul et dernier élément : la composante du mouvement vrai dans le sens du rayon visuel, ou la vitesse avec laquelle les étoiles s'éloignent ou s'approchent de la Terre[1].

Or, ces problèmes ont été tous deux abordés avec succès. Occupons-nous d'abord du premier, c'est-à-dire de la question de la translation du Soleil (ou ce qui revient au même du système solaire) dans l'espace, et voyons comment on a pu parvenir à le constater.

L'idée d'un tel déplacement a été formulée pour la première fois d'une façon un peu nette par Lalande, qui le regar-

1. Les mouvements propres mesurés sont, nous l'avons déjà dit, les projections de mouvements réels sur un plan perpendiculaire au rayon visuel; les mouvements dans le sens de ce dernier rayon sont les projections des mêmes mouvements réels sur une ligne perpendiculaire au premier plan. Ces deux éléments ou ces composantes du mouvement réel donneront donc, par leur composition, la direction et la vitesse du mouvement vrai de l'étoile considérée.

dait comme ayant une liaison nécessaire, logique, avec le mouvement de rotation du Soleil.

Voici en quels termes l'illustre astronome français exprimait cette opinion dans l'*Encyclopédie méthodique* :

« La rotation du Soleil, disait-il, indique un mouvement de translation ou un déplacement du Soleil qui sera peut-être un jour un phénomène bien remarquable dans la cosmologie. Le mouvement de rotation considéré comme l'effet physique d'une cause quelconque est produit par une impulsion communiquée hors du centre ; mais une force quelconque imprimée à un corps et capable de le faire tourner autour de son centre, ne peut manquer aussi de déplacer le centre, et l'on ne saurait concevoir l'un sans l'autre. *Il est donc évident que le Soleil a un mouvement réel dans l'espace absolu ;* mais comme nécessairement il entraîne la Terre, de même que toutes les planètes et les comètes qui tournent autour de lui, nous ne pouvons nous apercevoir de ce mouvement, à moins que, par la suite des siècles, le Soleil ne soit arrivé sensiblement plus près des étoiles qui sont d'un côté que de celles qui sont opposées ; alors les distances apparentes des étoiles entre elles auront augmenté d'un côté et diminué de l'autre, ce qui nous apprendra de quel côté se fait le mouvement de translation du système solaire. Mais il y a si peu de temps que l'on observe, et la distance des étoiles est si grande, qu'on ne pourra de longtemps constater la quantité de ce déplacement. »

Bradley, Tobie Mayer, Fontenelle, Lambert avaient également entrevu le mouvement de translation du Soleil comme une hypothèse probable, mais sans la formuler d'une manière aussi précise[1].

1. « Chaque étoile fixe, dit Lambert dans ses *Lettres cosmologiques*, a dans les plaines de l'espace son orbite tracée, qu'elle parcourt en traînant à sa suite tout son cortége de planètes et de comètes. Si l'on pouvait démontrer que tout corps qui tourne sur son axe doit aussi se mouvoir dans une

Dans tout ceci, on le voit, il ne s'agit que de prévisions théoriques, de conjectures. Il était réservé à W. Herschel de les appuyer le premier sur la base solide des observations, et il faut avouer que c'était une tâche encore plus ardue que celle de concevoir l'hypothèse elle-même, quelque élevée que fût celle-ci à l'époque où elle fut mise au jour pour la première fois. De quoi s'agissait-il, en effet? De démêler, au milieu des mouvements apparents ou réels dont les étoiles sont affectées, le mouvement d'ensemble que doit produire pour un observateur terrestre le déplacement supposé et encore inconnu en direction, du système solaire dans l'espace. La précession des équinoxes, la nutation, le mouvement annuel de la Terre autour du Soleil, l'aberration de la lumière sont autant de causes qui modifient, dans un sens ou dans l'autre, les positions des étoiles, jadis supposées fixes, sur la voûte étoilée. Chacune d'elles, en outre, a probablement un mouvement propre, comme on l'a constaté pour un grand nombre d'entre elles, lequel indique une véritable translation dans l'espace. Imaginons qu'on ait déterminé la part qui revient à chacune de ces causes, et qu'on lui ait assigné sa vraie grandeur, puis, qu'on en fasse abstraction, que restera-t-il? Plus rien, si le Soleil est immobile; mais si au contraire il est entraîné, avec tout son cortége de planètes, vers une certaine région du ciel, on trouvera nécessairement pour résidu de tous les autres déplacements, apparents ou réels, un mouvement d'ensemble.

orbite, on ne pourrait plus disputer à notre Soleil ce dernier mouvement, puisqu'il a le premier. Il y a apparence que le mécanisme du monde exige la liaison de ces deux mouvements, quoique nous n'en voyions pas distinctement la cause. Ce qu'il y a de certain, c'est que le Soleil se déplace.... » Parlant plus loin des mouvements propres des étoiles, il ajoute : « Comme ce déplacement apparent des étoiles fixes dépend du mouvement du Soleil aussi bien que du leur propre, il y aurait peut-être moyen de conclure de là vers quelle région du ciel notre Soleil prend sa course. Mais que de temps ne s'écoulera-t-il point avant que nous connaissions celui de la révolution du Soleil! Une année platonique (26 000 ans) y suffirait-elle? Peut-être que, dans une pareille année, il ne parcourt qu'un signe de son zodiaque. »

Comme l'avait fort bien prévu Lalande, dans la direction de la plage stellaire vers laquelle il s'avance, les étoiles sembleront s'éloigner les unes des autres : leurs distances angulaires s'élargiront à mesure que le système solaire se rapprochera, tandis qu'à l'opposé, il y aura un mouvement de convergence ; les étoiles se resserreront, par le seul fait que nous nous en éloignerons de plus en plus. C'est ainsi qu'un voyageur qui, au centre d'une vaste plaine, s'avance en ligne droite sur une route aboutissant à deux points extrêmes de l'horizon, voit au-devant de lui tous les objets, d'abord rapprochés, s'écarter peu à peu; tandis que, derrière lui, ceux qu'il quitte se rapprochent progressivement, par un effet de perspective aisé à comprendre. Sur les côtés, les arbres sembleront fuir en sens inverse de sa marche. Tous ces mouvements apparents, en sens divers, ont entre eux, et avec la direction de la route et la vitesse du voyageur, des rapports déterminés, de sorte que, s'il n'avait pas conscience de son propre mouvement, la corrélation dont il s'agit suffirait pour le lui faire reconnaître[1].

Toutefois, si le problème à résoudre était théoriquement très-simple, la solution par l'observation directe était, au contraire, d'une grande complexité. Avec sa hardiesse et sa persévérance ordinaires, W. Herschel l'aborda, et, dès 1783, il annonçait que la question était résolue, ou pour le moins largement ébauchée. Il avait conclu de la discussion des mouve-

1. La simplicité de l'explication familière que nous donnons ici ne doit pas faire perdre de vue l'extrême difficulté du problème. Les déplacements parallactiques résultant du mouvement de translation du Soleil et de tout notre système, ne sont pas seulement compliqués des autres mouvements apparents ou réels des étoiles ; ils sont aussi, comme il est aisé de s'en rendre compte, dépendants des distances des étoiles mêmes, qui sont extrêmement inégales, et d'ailleurs n'ont été mesurées qu'en fort petit nombre. Mais ce qui permet d'attacher une valeur positive aux déterminations effectuées, c'est leur concordance, bien que les méthodes employées par les divers astronomes que nous citons, n'aient pas été les mêmes. Voici les coordonnées

ments propres d'un petit nombre d'étoiles que le Soleil marche vers l'étoile λ de la constellation d'Hercule, en un point du ciel qui, à cette époque, avait 257° d'ascension droite et 25° de déclinaison boréale.

Cinquante ans plus tard, Argelander reprit, sur de nouvelles données, plus nombreuses et plus précises, la détermination du point de convergence. Puis vinrent Bravais, Otto Struve, Gauss, Galloway, dont les recherches ne firent que confirmer celles d'Herschel et d'Argelander. Les calculs combinés de Struve et d'Argelander donnent au point en question la position suivante pour l'époque 1840 :

Ascension droite.	259° 35'.1
Déclinaison boréale	34° 33'.6.

Struve réussit en outre à déterminer la vitesse du mouvement de translation. Vu de face, d'un point situé à la distance moyenne des étoiles de première grandeur, le chemin parcouru en une année par le Soleil aurait une valeur angulaire

trouvées successivement pour le point *apex*, ou *sommet* parallactique du mouvement du Soleil :

	Ascension droite.	Déclin. boréale.	
W. Herschel	260° 44'	26° 16'	p^r 1800
Argelander	258 23.6	28 45.6	1850
O. Struve.	261 52.6	37 33.0	—
Gallovay	260 33	34 20	—
Gauss circonscrivait le	258 40	30 40	—
point dans un qua-	258 42	30 57	—
drilatère ayant pour	259 13	31 9	—
sommets	260 4	30 32	—

M. Hœk, dans une lettre adressée à M. Delaunay, tire de ses recherches sur les comètes, la conclusion que si le Soleil a un mouvement de translation dans l'espace, sa vitesse doit être beaucoup plus petite que celle de la Terre dans son orbite. Le nombre donné par W. Struve, que nous rapportons plus loin, indique une vitesse 4 fois moindre. M. Yvon Villarceau enfin a signalé une conséquence théorique du mouvement *absolu* de translation du Soleil, qui peut un jour conduire à une vérification et à une détermination de sa direction et de sa vitesse : c'est que la constante de l'aberration doit varier pour les étoiles, en raison de leurs positions relativement au point du ciel vers lequel se dirige notre système.

de $0''.3392$, ce qui équivaut au nombre 1.623, le rayon moyen de l'orbite de la Terre étant pris pour unité. En résumé :

« Le mouvement du système solaire dans l'espace est dirigé vers un point de la voûte céleste, situé sur la ligne droite qui joint les deux étoiles de troisième grandeur π et μ d'Hercule, à un quart environ de la distance apparente de ces étoiles à partir de π. La vitesse de ce mouvement est telle que le Soleil, avec tous les corps qui en dépendent, avance



Fig. 265. Point de la constellation d'Hercule vers lequel se dirige le Soleil.

annuellement dans la direction indiquée, de 1.623 fois le rayon de l'orbite terrestre, ou de 240 000 000 de kilomètres. »

C'est une vitesse d'environ 660 000 kilomètres par jour, ou $7^{k}.6$ par seconde. Ainsi, l'observation a légitimé une fois de plus les inductions de la théorie. La réalité du mouvement qui entraîne le monde solaire dans les profondeurs de l'éther est prouvée. Il reste à savoir quelle est la nature de ce mouvement, si le Soleil se meut périodiquement autour de quelque centre inconnu, s'il fait partie d'un système stellaire particulier, fragment du grand système de la Voie lactée, ou s'il est le satellite d'un autre soleil. Peut-être le mouvement dont il est animé, n'est-il que l'effet des perturbations qu'il éprouve de la part des masses stellaires qui l'environnent à des distances inégales, et qui sont inégalement distribuées dans l'espace.

Dans la première hypothèse, celle d'un mouvement périodique, l'élément rectiligne de la route suivie par le système solaire vers les parages de la constellation d'Hercule, n'est qu'une portion restreinte de l'orbite solaire, et tout ce qu'on en peut déduire, c'est que le foyer inconnu est dans une direction rectangulaire avec celle du mouvement. Avec le temps, c'est-à-dire avec les siècles, on pourra constater un changement de direction et en déduire la courbure de l'orbite, le sens de sa concavité, et en définitive avoir une idée du point de convergence des rayons vecteurs et de la distance du foyer du mouvement. En coordonnant les mouvements propres du Soleil et des étoiles, comme s'ils avaient un foyer commun, Argelander a examiné le degré de vraisemblance que présente l'hypothèse où la constellation de Persée serait le centre général de leurs gravitations. Mædler regardait Alcyone, la plus brillante des Pléiades, comme le soleil central autour duquel nous gravitons, et les Pléiades elles-mêmes, comme le groupe dont la masse détermine notre mouvement. Il est bien évident que ce sont là des hypothèses, intéressantes sans aucun doute, parce qu'elles fixent pour ainsi dire nos idées et donnent un but aux investigations futures, mais qu'il ne faut admettre ni rejeter absolument, en l'absence d'éléments suffisants pour se prononcer en connaissance de cause.

§ 3. MOUVEMENTS DES ÉTOILES DANS LE SENS DU RAYON VISUEL.

L'idée de constater et de mesurer le mouvement d'un corps lumineux par les modifications que peut apporter ce mouvement à la nature de sa lumière, a été émise pour la première fois par notre savant compatriote M. Fizeau (*Annales de physique et de chimie*, t. XIX, 4[e] série). Essayons de faire comprendre la nature de ces modifications, en les comparant aux variations de hauteur que subit le son émis par un corps

sonore, lorsque ce dernier s'éloigne de l'observateur ou au contraire s'en approche. On sait que le sifflet d'une locomotive, lorsque passe devant vous un train de grande vitesse, donne un son plus aigu tant que la machine s'approche, puis un son plus grave quand elle s'éloigne. La raison de cette modification est aisée à comprendre. Les ondes sonores, dans la première période, arrivent à l'oreille dans un temps donné, une seconde je suppose, en plus grand nombre que si le corps sonore était en repos; le son paraîtra donc formé par un plus grand nombre de vibrations, et par suite plus aigu; dans la seconde période au contraire, les vibrations arriveront moins nombreuses dans le même temps, et la hauteur du son sera diminuée. Virtuellement, les longueurs d'onde sont augmentées dans le second cas, et diminuées dans le premier.

Ce qui arrive pour les ondes sonores doit arriver pareillement pour les ondes lumineuses. Seulement, pour qu'une modification puisse être constatée, il faut que la vitesse du corps qui s'approche ou qui s'éloigne ne soit pas une fraction tout à fait insensible de la vitesse de la lumière, parce que c'est le rapport des deux vitesses qui mesure l'allongement ou l'accourcissement des longueurs d'onde[1]. Il y a d'ailleurs entre le son et la lumière une différence qui aurait pu rendre impossible la constatation dont il s'agit : un son unique a une hauteur déterminée, dépendant du nombre des vibrations du corps sonore ou de la longueur de l'onde ; la lumière, à moins d'être absolument monochromatique, est au contraire com-

1. M. Doppler a appelé le premier l'attention sur le rapport qui doit exister entre les couleurs des étoiles et leurs mouvements. Selon lui, toutes les étoiles sont blanches; seulement celles qui s'éloignent paraissent rouges, et celles qui se rapprochent ont une lumière tirant sur le vert ou le bleu. Mais, ainsi que le fait remarquer M. Fizeau, avec raison croyons-nous, la lumière blanche renfermant des rayons plus réfrangibles que le violet et moins réfrangibles que le rouge, l'effet du mouvement rendrait sensibles à l'œil les uns ou les autres de ces rayons, les couleurs disparues se reproduiraient, et en résumé la couleur résultante ne paraîtrait point modifiée.

posée d'une multitude d'ondes de longueurs différentes. Comment démêler l'une quelconque d'entre elles, et mesurer ses variations? C'est l'analyse spectrale qui a permis de lever cette grave difficulté. Supposons qu'en étudiant le spectre de la lumière d'une étoile, on puisse arriver à y reconnaître des raies, et à en identifier quelques-unes aux raies d'une substance terrestre métallique, du magnésium ou du sodium, par exemple. On verra bientôt qu'une semblable étude a été menée à bonne fin. Cela posé, que l'observateur emploie le même spectroscope à analyser la lumière de l'étoile et simultanément la lumière artificielle du sodium ou du magnésium. Cette comparaison pourra lui permettre de voir s'il existe une différence de réfrangibilité apparente entre deux raies qui doivent avoir la même position sur les spectres en cas de repos. Si une telle déviation existe, si l'on peut mesurer un déplacement vers le violet ou vers le rouge, on en conclura que l'étoile se rapproche ou s'éloigne de la Terre, et il sera possible de mesurer la vitesse de ce mouvement. MM. Huggins et Miller, Maxwell, Secchi ont appliqué cette méthode, et n'ont pu, tout d'abord, constater de déplacement égal à celui des deux composantes de la raie double D. Un tel déplacement (en le supposant équivalent à une différence de longueur d'onde de 4 dix-millionièmes de millimètre) correspondrait à une vitesse de 304 kilomètres par seconde, dix fois aussi grande que celle de la Terre dans son orbite.

Mais, en poursuivant ces recherches, en perfectionnant les procédés d'observation, M. Huggins parvint, en 1868, à constater un très-léger changement de réfrangibilité dans l'une des lignes du spectre de Sirius, et ses mesures lui montrèrent que cette étoile s'éloigne de la Terre avec une vitesse qui, pendant le cours des observations, varia de 26 à 36 milles anglais, ou de 42 à 58 kilomètres, par seconde. Il faut déduire de ces nombres la vitesse de la Terre dans son orbite, vitesse qui pendant la durée des observations varia (dans le sens du

rayon visuel) de 16 à 23 kilomètres par seconde. Restait, pour le mouvement particulier à Sirius, une vitesse d'éloignement comprise entre 18 et 22 milles ou 29 et 35 kilomètres par seconde. Cette différence entre des résultats obtenus à trois mois d'intervalle, peuvent s'expliquer, pensait M. Huggins, par la variation de vitesse selon le rayon visuel, si le mouvement de Sirius a lieu dans une orbite elliptique, ainsi que cela résulte des recherches de Peters, dont il sera question plus loin.

M. Huggins a appliqué cette méthode délicate et difficile à un certain nombre d'étoiles; mais des doutes ayant été élevés sur la rigueur de la méthode (par le P. Secchi, qui l'avait adoptée cependant un des premiers), il était intéressant de savoir si des recherches indépendantes aboutiraient à des résultats concordants. Le tableau qui suit répond à ce désir. Il montre, dans deux colonnes différentes, la vitesse dont s'éloignent où s'approchent de la Terre les étoiles étudiées, d'une part par M. Huggins, de l'autre par MM. Christie et Maunder, astronomes de l'Observatoire de Greenwich.

MOUVEMENTS DES ÉTOILES DANS LE SENS DU RAYON VISUEL.

ÉTOILES[1].	D'après Huggins. Vitesse en kilomètres.	D'après Christie. Vitesse en kilomètres.
α Andromède	—	— 56
Aldébaran	+ ?	+
La Chèvre	+	+ 20
Rigel	+	+
Bételgeuze	+ 35	+ 121
Sirius	+ 29 à 35	+ 40
Castor	+ 37 à 45	+ 40
Procyon	+	+ 64
Pollux	— 79	—
Régulus	+ 19 à 27	+ 48
γ Lion	— ?	— 102
β Grande-Ourse	+ 27 à 34	+ 38
α Grande-Ourse	— 74 à 97	—

1. Le signe + indique une augmentation de distance : l'étoile s'éloigne de la Terre ; le signe — une diminution : l'étoile se rapproche. Le sens du mouvement a été seul constaté pour quelques étoiles. ? marque les observations douteuses.

β Lion	+	—
γ Grande-Ourse	+ 27 à 34	+ ?
Épi.	+	+
η Grande-Ourse	+ ?	—
Arcturus	— 88	— 62
ε Bouvier.	—	—
α Couronne.	+	+ 58
Wéga.	— 71 à 87	— 62
α Cygne	— 63	— 65
α Pégase.	—	— 40

L'accord est satisfaisant, comme on peut le voir. Le sens des mouvements mesurés ne diffère que pour deux étoiles, et encore les observations de M. Huggins étaient douteuses. Quant aux vitesses, il y a des divergences, qui sont assez sensibles dans les mouvements de Bételgeuze, de Régulus et d'Arcturus; mais les autres ne s'éloignent guère des erreurs probables d'observation dans une recherche aussi délicate. Et puis, n'est-il pas possible qu'elles proviennent en partie des variations du mouvement, si ce mouvement n'est pas rectiligne[1] ?

1. Soient, à une époque donnée, S la position du Soleil, E celle d'une étoile, SS′ le chemin parcouru en 1 seconde par le système solaire (chemin projeté sur le plan où se meut l'étoile). Le mouvement propre de l'étoile lui fait parcourir en une seconde, dans un sens perpendiculaire au rayon visuel, le chemin Ea, et l'on a trouvé par le déplacement des lignes de son spectre, que son mouvement l'éloigne de la Terre d'une quantité Eb en une seconde. Pour avoir le chemin réel parcouru par l'étoile dans l'espace, il est clair qu'il faudrait combiner les composantes du mouvement solaire avec ceux de l'étoile; dans le cas de la figure, la composante Ea doit être diminuée de $an =$ Sc, et la composante Eb augmentée de $bm =$ Sd. La diagonale EE′ du rectangle nEmE′ donnera le mouvement vrai en grandeur et en direction. Mais EE′ n'est que la corde de l'arc parcouru : la courbe décrite, si le mouvement n'est pas rectiligne, s'obtiendrait par la combinaison d'observations faites à des intervalles suffisamment grands.



Fig. 266. Vitesse réelle d'une étoile. Composition de ses mouvements propres et de celui du Soleil.

En tout cas, nous voilà en possession d'un élément nouveau, essentiel à la connaissance des vrais mouvements des étoiles. On peut en faire l'application à quelques-unes des étoiles dont la parallaxe et le mouvement propre annuels sont connus, et dont nous venons de trouver la vitesse dans le sens du rayon visuel. On obtient les résultats suivants. Sirius s'éloigne du système solaire avec une vitesse approchée de 56 kilomètres par seconde; la Chèvre nous fuit à raison de 51 kilomètres. Au contraire, Wéga et Arcturus se rapprochent du Soleil ou de la Terre ; elles parcourent par seconde, la première 61 et la seconde 100 kilomètres. La plus faible de ces vitesses dépasse des $\frac{3}{4}$ celle de la Terre dans son orbite et vaut près de sept fois celle du Soleil; la plus forte atteint près de quatre fois celle de notre planète et plus de treize fois celle du système solaire.

On voit de combien il s'en faut que les étoiles *fixes* des anciens astronomes soient immobiles, puisque c'est parmi elles qu'il faut chercher les plus rapides des mouvements célestes connus. Le repos n'est donc nulle part dans l'Univers ; aucun de ses points n'échappe à cette grande loi du mouvement universel. Une conséquence évidente de cette perpétuelle mobilité des astres, c'est que le mouvement vrai, absolu, de chacun d'eux dans l'espace, ne peut être connu ni dans sa vitesse, ni dans sa direction, ni dans la forme de la trajectoire décrite, puisqu'aucun point de repère fixe ne permet de rapporter ce mouvement à une commune origine.

Il est donc certain que nous ne connaîtrons jamais d'une manière absolue la route que nous suivons dans l'espace, et nous en pouvons dire autant de tous les corps du monde solaire. La Lune circule autour de la Terre, mais l'ellipse qu'elle décrit ne nous donne qu'un mouvement relatif; car en même temps la Terre tourne autour du Soleil, et, ce dernier supposé immobile, il en résulte déjà que notre satellite décrit une courbe à inflexions variées, une espèce de cycloïde que

les perturbations planétaires compliquent encore. Mais puisque le Soleil se meut, la courbe de l'orbite lunaire est elle-même entraînée dans ce mouvement, et sa forme réelle dans l'espace se complique de nouveau. Qui sait où s'arrête cet enchevêtrement des courbes, cette combinaison d'orbites, dont la dernière connue n'est sans doute qu'apparente? Le Soleil, nous le verrons plus loin, est dans la Voie Lactée, qui paraît être une agglomération de systèmes de mondes, et il est pro-

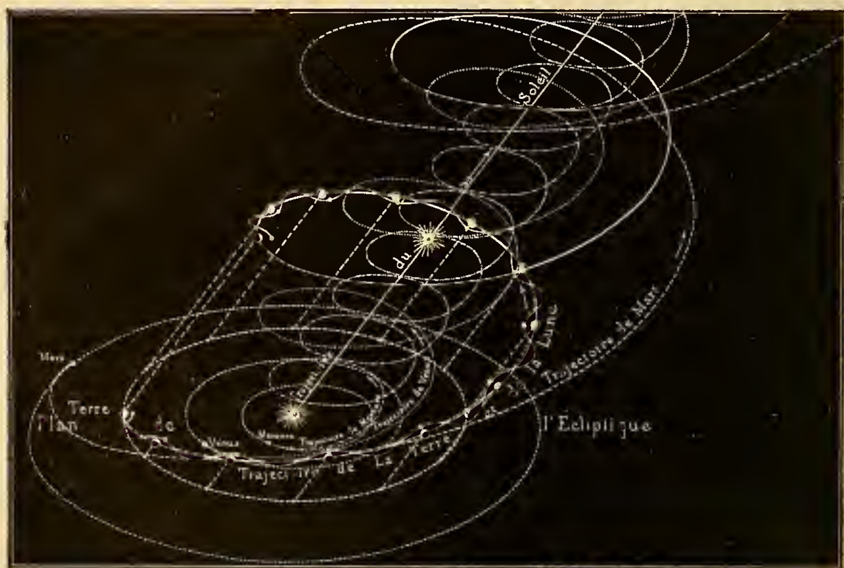


Fig. 267. Trajectoires réelles décrites par les planètes, en vertu du mouvement de translation dans l'espace du système solaire.

bable qu'il fait partie de l'un de ces systèmes particuliers; mais l'ensemble des astres qui composent ce système est sollicité par les gravitations de tous les autres, il en résulte sans doute un mouvement d'ensemble, peut-être dans le plan principal de la grande nébuleuse. La Voie Lactée elle-même, avec ses millions d'étoiles, qu'est-elle dans l'Univers visible, sinon un archipel dans l'Océan? mais un archipel en marche, qui vogue dans les profondeurs infinies, comme toutes les autres voies lactées dont les télescopes ont signalé l'existence. Quand

PÉGASE CYGNE RENARD LYRE HERCULE COURONNE BOUVIER
DAUPHIN Wéga Boréale Arcturus



CAPRICORNE Atair OPHIUCUS Antarès SERPENT l'Épi
VERSEAU AIGLE SAGITTAIRE SCORPION BALANCE VIERGE

LE CIEL DE L HORIZON DE PARIS

Coté Sud, Vu à Minuit, le 21 Juin (Solstice d'Été.)

E. Guillemin et Ph. Benoist del. *Imp. Fraillery à Paris*

la pensée se plonge dans ces abîmes, elle prend le vertige; elle perd pied avec la science même qui a su lui ouvrir ces perspectives dans l'infini de l'espace et de la durée!

Si les étoiles se meuvent inégalement et dans divers sens, si le Soleil progresse vers un certain point du ciel, qu'en doit-il résulter à la longue pour l'aspect de la voûte étoilée vue de la



Fig. 268. La constellation d'Orion. Apparence actuelle.

Fig. 269. La constellation d'Orion dans 36000 ans.

Terre? Une déformation continue qui finira par donner aux constellations d'autres apparences que celles qu'on leur connaît aujourd'hui. « La Croix du Sud, dit Humboldt, ne conservera pas toujours sa forme caractéristique, car ses quatre étoiles marchent en sens différents et avec des vitesses inégales. On ne saurait calculer aujourd'hui combien de myriades d'années doivent s'écouler jusqu'à son entière dislocation[1]. » Nous

1. *Cosmos*, III, p. 215. Ces paroles d'Humboldt doivent être aujourd'hui rectifiées ou complétées. Des cartes du ciel ont été dressées d'après les cata-

pouvons donc être tranquilles et étudier le ciel tel qu'il est, sans craindre une confusion prochaine : laissons à nos arrière-neveux de l'an 9000 le soin de reconnaître la position que possédera alors l'étoile des Chiens de chasse classée sous le n° 1830 dans le catalogue de Groombridge, que son mouvement propre aura entraînée jusqu'au milieu de la Chevelure de Bérénice.

logues des mouvements propres connus, dus à MM. Stone et Main. D'après une carte de ce genre publiée par M. Proctor, nous donnons ici quelques exemples des transformations que subiront les constellations par l'effet de l'accumulation des mouvements propres des étoiles dans la suite des siècles. Les constellations de la Grande-Ourse, de Cassiopée, d'Orion sont tracées dans les figures 261 à 264, 268 et 269, d'une part avec leurs formes actuelles, de l'autre avec celles qu'elles auront dans 36 000 ans, si toutefois les mouvements propres dont les étoiles qui les composent sont affectées, conservent pendant ces 360 siècles les directions et les intensités que les flèches indiquent. C'est là, on le comprendra, une réserve nécessaire. M. Faye, s'appuyant sur des observations de plus d'un demi-siècle, affirmait qu'il n'avait pu reconnaître dans le mouvement propre de 1830ᵉ Groombridge, « rien qui indiquât un défaut d'uniformité dans la vitesse, ni une altération quelconque dans la direction. Si l'on prolonge indéfiniment, continue notre savant compatriote, l'arc de grand cercle parcouru par l'étoile, de manière à tracer sur la sphère la série des points qu'elle occupera successivement dans la suite des siècles, on arrive à une région remarquable occupée par un amas d'étoiles qu'on nomme la Chevelure de Bérénice. Et l'on peut affirmer que si le mouvement de la 1830ᵉ Groombridge ne se ralentit pas, s'il ne change pas de direction, dans 7080 ans, courte période pour des mouvements de ce genre, elle aura parcouru 13° 49′ (13° 41′ selon Argelander); elle sera au milieu de cet amas d'étoiles dont rien ne la distinguera : ce sera une étoile de 6ᵉ grandeur de plus au milieu d'un amas d'étoiles de 5ᵉ et de 6ᵉ grandeur. »

IV

ÉTOILES DOUBLES ET MULTIPLES.

§ 1. NOMBRE ET CLASSIFICATION DES ÉTOILES DOUBLES. ÉTOILES MULTIPLES.

Il y a dans le voisinage de Wéga, la plus brillante étoile de la constellation de la Lyre, une petite étoile de 4ᵉ grandeur, dont la forme allongée, reconnaissable à la vue simple, laisse soupçonner la réunion de deux points lumineux. En effet, quand on se sert pour l'examiner d'une simple lorgnette de spectacle, on voit distinctement deux étoiles (ε, ou 4 et 5, dans les catalogues), l'une de grandeur 4.5, l'autre de grandeur 5.4, séparées l'une de l'autre par un intervalle égal à la neuvième partie environ du diamètre apparent de la Lune[1].



Fig. 270. ε de la Lyre. 1. Vue double dans une petite lunette (pouv. 4). 2. Vue dans une lunette 15 fois plus forte (pouv. 60).

Est-ce là ce qu'on nomme, en astronomie, une *étoile double?* Non : il y a bien, entre cette réunion de deux étoiles et les couples stellaires, une certaine analogie ; mais la distance

1. C'est-à-dire égal à 3′ 27″. Heis les voit séparées à l'œil nu, par un temps bien clair. « Stellæ 4 et 5 Lyræ claro aere sejunctæ videntur, » dit-il dans son catalogue de l'*Atlas cœlestis novus*.

des deux astres est ici beaucoup trop grande, et la dénomination d'étoiles doubles est restreinte à celles dont la distance apparente ne dépasse pas la sixième partie environ de l'intervalle qu'on vient de citer. A l'œil nu, ou même dans les lunettes de moyenne force, un couple d'étoiles aussi rapprochées apparaît comme un simple point lumineux; il faut employer, pour distinguer les étoiles qui le composent, des instruments d'une force optique considérable. En général, on considère comme formant une étoile double tout couple dont les deux



Fig. 271. Étoiles doubles 4 et 5, composant ε de la Lyre, vues dans un télescope de 10 à 12 centimètres d'ouverture.

étoiles composantes sont à une distance inférieure à 32″. Si, dans un cercle décrit autour d'une étoile avec un rayon de 32″, il se trouve deux autres points lumineux, la réunion des trois étoiles ainsi groupées forme une étoile triple. Elle est quadruple ou en général multiple, si le cercle en question renferme quatre, cinq ou un plus grand nombre d'étoiles. D'après cette définition, les deux étoiles 4 et 5 de la Lyre ne forment ni une étoile double ni une étoile multiple. Déjà cependant, l'application d'un moyen pouvoir optique laisse voir chaque composante oblongue. (Voy. fig. 270, 2.) Mais

si l'on applique une lunette d'un pouvoir suffisant à l'examen de chacune des composantes, on trouve que l'une et l'autre sont séparément formées de deux étoiles, mais si rapprochées, que les intervalles séparant les composantes de chaque couple mesurent à peine 3″, c'est-à-dire seulement la 70e partie de la distance totale des couples eux-mêmes[1]. Il y a un siècle, on ne connaissait que vingt groupes de ce genre; aujourd'hui les observateurs en ont recensé plus de dix mille[2].

Il serait intéressant de savoir quelle est la proportion du nombre des étoiles doubles à celui des étoiles simples dans les divers ordres de grandeur. Pour établir son catalogue de 3112 étoiles doubles, W. Struve a dû passer en revue 120 000 étoiles, depuis la première jusqu'à la 8e grandeur. Cela fait 1 étoile double sur 40, ou 1 étoile double contre 39 étoiles simples. Cette proportion générale paraît plus forte, si l'on s'en tient aux six ou sept premiers ordres de grandeur. En effet, sur les 5421 étoiles visibles à l'œil nu du catalogue de Heis, il y en a 425 qui se trouvent dans le catalogue de Struve; cela fait à peu près 1 étoile double sur 13, ou 1 double contre 12 simples. Mais il est intéressant de voir com-

1. Struve. En réalité, comme le montre la figure, il y a huit étoiles comprises dans ce que l'œil nu fait voir comme une étoile un peu allongée; trois petites étoiles, dont 2 de 13e grandeur, se trouvent encore dans l'intervalle qui sépare 4 et 5. Comme leurs distances mutuelles sont comprises entre 20″ et 30″, ces trois étoiles forment une étoile triple comprise entre deux étoiles doubles. Les composantes de ε (ou 4) sont de 5e et 6.5 grandeur; celles de 5 sont l'une de 5e, l'autre de 5.5.

2. Kirch, Bradley, Flamsteed, Tobie et Christian Mayer, W. Herschel dans le siècle dernier; les deux Struve, Bessel, Argelander, Dembowski, Savary, Y. Villarceau, Encke et Gall, Preuss et Mædler, sir John Herschel, dans la première moitié du dix-neuvième siècle, ont attaché leurs noms, les uns à la découverte, les autres à l'étude mathématique de ces couples, aujourd'hui si nombreux et si intéressants. Le dernier catalogue général publié par sir J. Herschel renferme un nombre total de 10 300 étoiles doubles ou multiples; mais tous les ans, de nouveaux couples viennent s'ajouter aux couples déjà recensés.

ment ces 425 couples se répartissent selon les grandeurs; le voici :

1[re] grandeur		1	étoile	double	sur	13	simples ou	1	contre	12.0
2[e]	—	10	—	—	—	48	—	1	—	3.8
3[e]	—	33	—	—	—	152	—	1	—	3.6
4[e]	—	50	—	—	—	313	—	1	—	5.2
5[e]	—	88	—	—	—	854	—	1	—	8.7
6[e]	—	242	—	—	—	3974	—	1	—	15.4

Il semble résulter de là que la proportion des étoiles doubles va en diminuant avec l'éclat, c'est-à-dire en général avec la distance, comme cela ressort déjà de la comparaison des étoiles doubles visibles à l'œil nu et de celles qui exigent le secours des télescopes. Cela tient probablement en partie à la faiblesse relative du satellite, c'est-à-dire de l'étoile la plus faible dans les couples où l'étoile principale, ou la primaire, est elle-même très-petite, mais aussi et pour une part sans doute plus forte, à la difficulté de dédoubler des couples dont les composantes ont une trop petite distance apparente et se confondent ainsi dans les télescopes. Ces deux causes se rapportent l'une et l'autre à l'augmentation de la distance qui correspond à la diminution de l'éclat[1].

La réunion de deux soleils dans un petit espace de la voûte étoilée est-elle purement fortuite? Ou bien faut-il la considé-

1. W. Struve a divisé les étoiles doubles en huit classes, selon la distance des composantes. Voici quelques échantillons pris dans chacune d'elles :

1[re] *classe.* De 0″ à 1″.	γ Couronne boréale. ζ Hercule. η Couronne. ω Lion. Atlas des Pléiades. 42 Chevelure de Bérénice	3[e] *classe.* De 2″ à 4″.	γ Lion. γ Vierge. δ Serpent. ε Bouvier. ζ Orion. 44 Bouvier.
2[e] *classe.* De 1″ à 2″.	δ Cygne. ζ Bouvier. ξ Grande-Ourse. σ Couronne boréale.	4[e] *classe.* De 4″ à 8″.	α Croix du Sud. α Hercule. ζ Couronne. α Gémeaux. 70 Ophiucus. 32 Éridan.

rer comme une liaison réelle des deux astres, formant un véritable système? Dans la première hypothèse, le rapprochement des deux étoiles n'est qu'apparent ; il est dû à un effet de perspective, le rayon visuel qui aboutit à la plus rapprochée des deux se confondant presque avec celui qui va chercher la seconde à des profondeurs beaucoup plus considérables encore. Dans le second cas, les deux soleils sont à des distances à peu près égales de la Terre, et leur rapprochement apparent vient de la petitesse relative de leur distance mutuelle. Mais alors les deux étoiles exercent sans doute l'une sur l'autre une action attractive qui dépend de leurs masses ; elles doivent tourner autour de leur centre de gravité commun, c'est-à-dire former un système. De là cette distinction des étoiles doubles en couples *optiques* et en couples *physiques*, selon que la réunion des deux composantes de chaque couple est simplement apparente ou réelle.

La réunion de deux soleils à l'intérieur d'un cercle dont le rayon maximum est de 32″, constitue les étoiles doubles, au sens restreint où se placent les astronomes qui, comme W. Herschel, W. Struve, sir J. Herschel, se sont particulièrement occupés de cet objet. Mais il est des exemples de groupes où

	β Orion.		ζ Poissons.
5e *classe.*	η Cassiopée.	7e *classe.*	α Chiens de chasse.
De 8″ à 12″.	ι Orion.	De 16″ à 24″.	χ Taureau.
	γ Bélier.		41 Dragon.
	α Centaure.		δ Hercule.
6e *classe.*	β Scorpion.	8e *classe.*	η Lyre.
De 12″ à 16″.	ζ Grande-Ourse.	De 24″ à 32″.	ψ Dragon.
	61e Cygne.		χ Cygne.

Il a, en outre, cru nécessaire de subdiviser chacune de ces classes en deux groupes, le premier comprenant les étoiles doubles brillantes, dont le satellite n'est pas au-dessous de la 8e grandeur ; le second groupe comprend les autres étoiles. Cette division en classes a l'inconvénient de n'être pas immuable, puisque, comme on le verra plus loin, les composantes des couples physiques se déplacent. Mais cet inconvénient se change en avantage, en permettant de constater ces mouvements par le passage d'une étoile d'une classe à l'autre.

les satellites sont à une distance plus éloignée de la principale, et qui cependant paraissent être des couples physiques. Quand le nombre des étoiles comprises dans le cercle en question est trois, quatre, cinq, etc., les étoiles sont alors *triples*, *quadruples*, *quintuples*..., et en général *multiples*. Parmi les étoiles du catalogue de Struve, « il y a, dit cet astronome, 11 groupes ternaires brillants où chacune des trois étoiles n'est pas au-dessous de la 8ᵉ grandeur, et deux groupes qua-



Fig. 272. Étoiles triples et quadruples, d'après les observations de sir J. Herschel. — 1. Étoile triple de la Licorne (73 J. H. 11ᵉ, 13ᵉ et 15ᵉ gr.). — 2. Étoile triple 30 Pégase (962 H. 5ᵉ, 19ᵉ et 20ᵉ gr.). — 3. Étoile quadruple du Taureau (343 H.). — 4. Étoile quadruple de Cassiopée (2166 H.).

druples. J'ai indiqué 57 étoiles triples et multiples où l'un des satellites au moins est au-dessous de la 8ᵉ grandeur. J'ai, en outre, donné un catalogue de 59 étoiles triples et multiples dans un sens plus étendu, parmi lesquelles, auprès de deux étoiles distantes de 32″ tout au plus, on en découvre une troisième, une quatrième à une distance moindre de 80″. » La plupart de ces groupes forment des systèmes physiques, c'est-à-dire sont de réelles associations de soleils, ainsi que nous le verrons bientôt. En résumé, le catalogue de W. Struve renferme en tout 129 étoiles multiples sur un nombre de 3112,

ou bien 1 sur 24. Les six premiers catalogues de J. Herschel, qui contiennent à peu près deux fois autant d'étoiles doubles (il y en a 5449 nouvelles), donnent :

Sur 5449 étoiles multiples	275	étoiles triples.
	25	— quadruples.
	4	— quintuples.
	2	— sextuples.
	1	— septuple.
	1	— multiple.

En tout 308 étoiles multiples, ou 1 sur 17.7 environ.

Citons quelques-unes des plus remarquables étoiles de ces derniers groupes.

Étoiles triples.

ψ Cassiopée.
γ Andromède.
ζ Écrevisse.
α Andromède.
ξ Scorpion.
γ Vierge.
η Couronne.
11 Licorne.
12 Lynx.
ξ Balance.

Étoiles quadruples.

β Lyre.
β Gémeaux.
β Petit-Cheval.
μ Sagittaire.
8 Lézard.

—

Étoiles quintuples.

ω^3 Cygne.
1 étoile du Cocher.
1 étoile du Taureau.

Étoiles sextuples.

1 étoile du Dauphin.
1 étoile des Chiens de chasse.
1 étoile de la Couronne boréale.

—

Étoile septuple.

θ Orion.
1 étoile du Grand-Nuage.

Quelques-uns des groupes d'étoiles multiples sont fort intéressants. La variété d'éclat ou de grandeur, et de cou-



Fig. 273. Étoile multiple sextuple (548 H.).



Fig. 274. Étoile septuple dans le Grand-Nuage (3796 H.).

leur des composantes, leurs configurations, leurs positions au centre d'amas stellaires ou de nébuleuses en font des

objets d'une délicatesse et d'une élégance (ce sont les expressions de J. Herschel) qui ne le cèdent en intérêt qu'aux questions relatives à la dépendance physique de ces systèmes et aux lois qui les régissent. Nous en donnons ici quelques exemples (fig. 272 à 274), d'après la description de l'observateur.

2. ÉTOILES DOUBLES PHYSIQUES. SYSTÈMES BINAIRES.

On vient de voir que les étoiles doubles ont été divisées en deux classes ou catégories, celle des couples optiques et celle des couples physiques. Une telle distinction n'est-elle pas arbitraire, et si, comme nous allons le voir, elle correspond bien aux faits, à quels caractères peut-on reconnaître qu'une étoile double appartient à l'une ou à l'autre de ces catégories? Voyons d'abord comment, dès l'origine, s'est justifiée la distinction.

Quand le nombre des étoiles doubles connues était fort restreint, on aurait pu croire qu'elles résultaient d'un groupement accidentel, purement apparent ou optique. Cependant déjà, le calcul des probabilités démontrait qu'il devait y avoir une réelle connexion physique entre le plus grand nombre des étoiles ainsi rapprochées. Mitchell, par exemple, affirmait qu'il y avait 500 000 à parier contre 1, que les six étoiles visibles à l'œil nu des Pléiades ne sont pas groupées par l'effet du hasard; c'était là un exemple un peu exceptionnel; mais, en partant d'un raisonnement analogue, ce savant fut également conduit comme Lambert, Kant et Christian Mayer le furent à leur tour, à regarder les étoiles doubles comme des systèmes de deux soleils gravitant l'un vers l'autre. Ces premières affirmations étaient d'abord quelque peu conjecturales; mais elles se justifièrent de plus en plus à mesure que vint à croître le nombre des étoiles doubles observées, et elles ne

laissèrent plus aucun doute, quand les mouvements de révolution furent positivement constatés pour quelques-unes d'entre elles. W. Struve, s'appuyant sur la remarque évidente que, dans l'hypothèse où il n'y aurait que des étoiles doubles optiques, le nombre de ces couples devrait augmenter à mesure que l'on passe d'une classe à la suivante, c'est-à-dire à mesure que la distance des composantes est plus grande, trouva, au contraire, que ce nombre diminue. Ainsi les étoiles doubles de la 8e classe (de 24″ à 32″) sont moins nombreuses que celles de la 1re (0″ à 1″), tandis qu'elles devraient être 448 fois plus nombreuses, si toutes les étoiles doubles étaient optiques. Appliquant alors le calcul des probabilités aux nombreux éléments d'observations qu'il avait rassemblés, il arriva aux importantes conclusions suivantes :

« Sur 653 étoiles doubles brillantes des 8 classes (de 0″ à 32″), il y a au moins 605 étoiles doubles physiques, et seulement 48 étoiles doubles optiques; donc 1 *couple optique sur* 13 *couples physiques ;*

« Les 178 étoiles doubles brillantes de 1re et de 2e classe sont *toutes, sans exception, des couples physiques ;*

« Parmi les 263 étoiles doubles d'une distance comprise entre 2″ et 8″, 260 sont physiques ; 3 seulement sont optiques, ou 1 *sur* 88;

« Sur 106 étoiles doubles distantes de 8″ à 16″, 97 sont vraisemblablement physiques et 9 optiques ; ou environ 1 optique sur 12;

« Sur 106 étoiles doubles distantes de 16″ à 32″, 70 sont des couples physiques, 36 des couples optiques ;

« Sur 612 étoiles doubles dont le satellite est très-faible, il y en a encore 483 qu'on peut considérer comme des couples physiques. »

Les mêmes considérations enfin ont conduit Struve à regarder comme liées par une connexion physique, les compo-

santes d'un grand nombre des systèmes d'étoiles ternaires ou d'étoiles multiples[1].

Il ne s'agit jusqu'à présent que de probabilités, de conjectures, basées, il est vrai, sur un ensemble d'observations nombreuses. Arrivons à des caractères distinctifs plus précis, permettant de décider de la nature probable ou même certaine d'un couple individuel, d'une étoile double déterminée.

L'un de ces caractères, c'est le mouvement propre des composantes du couple. Ont-elles un mouvement propre commun, de même sens et de même amplitude? Il est alors extrêmement probable qu'il s'agit d'un véritable système, de deux étoiles liées par une dépendance physique réciproque. Au contraire, l'une des deux étoiles est-elle animée d'un mouvement propre, auquel son compagnon ne participe point, ou qui diffère notablement en direction et en vitesse du mouvement de ce dernier, il est probable que l'association n'est point réelle, que la réunion est due à la coïncidence fortuite des rayons visuels, et que les deux étoiles sont à des distances fort inégales du système solaire. La 61e du Cygne a été un des premiers exemples reconnus du premier cas : les deux composantes de 6e grandeur qui forment ce couple, ont un mouvement propre commun qui les a fait déplacer de 12′ en 150 ans dans une même direction. Struve, en examinant 41 étoiles doubles du catalogue de Bessel, a reconnu que le mouvement propre de la principale est le même que celui du satellite pour 40 d'entre elles, « ce qui, ajoute-t-il, en décide l'alliance physique. » Ce caractère a permis de reconnaître une pareille dépendance dans des couples dont la distance est comprise entre 32″ et 7′ :

1. On vient de voir que cet astronome fait une distinction des étoiles au point de vue de l'éclat relatif des composantes, et cela se conçoit. Quand l'étoile principale et son satellite sont à peu près de même grandeur, toutes deux brillantes ou toutes deux faibles, la probabilité qu'on a affaire à des couples physiques est plus grande. Au contraire, une étoile brillante accompagnée d'une étoile très-faible, laisse supposer que celle-ci est peut-être beaucoup plus éloignée, et qu'il s'agit d'un couple optique.

telle est l'étoile double 40 de l'Éridan; telle est encore la brillante étoile double Castor qui a un 3ᵉ satellite de 10ᵉ grandeur à 73″ de la principale, de sorte que probablement il y a là un véritable système ternaire. Parmi les étoiles multiples, θ d'Orion est, sous ce rapport, une des plus remarquables. On la connaissait d'abord comme une étoile quadruple, dont les composantes forment un quadrilatère placé au centre d'une nébuleuse que nous décrirons bientôt, et qui sont de 4ᵉ, 6ᵉ, 7ᵉ et 8ᵉ grandeur. L'emploi de télescopes plus puissants a fait découvrir ensuite deux fort petites étoiles, de sorte qu'il y a là un groupe de six étoiles, dont Humboldt disait : « Probablement l'étoile sextuple Thêta d'Orion constitue un véritable système, car les cinq plus petites étoiles partagent le mouvement propre de l'étoile principale. » Ajoutons que M. Lassell a récemment découvert une septième composante dans ce remarquable système, de sorte que θ d'Orion est une étoile septuple. Une étude attentive de ce groupe, sur lequel est fixée l'attention des astronomes, finira par montrer ce qu'il y a de vrai dans l'hypothèse d'Humboldt : verra-t-on un jour les composantes se déplacer sur leurs orbites, et la science s'enrichir d'un fait nouveau bien digne de la méditation des géomètres, celui des mouvements réciproques et simultanés de sept soleils?



Fig. 275. θ d'Orion, étoile sextuple, d'après sir J. Herschel.



Fig. 276. θ d'Orion, étoile septuple, d'après M. Lassell.

En revanche, d'autres étoiles doubles, comme Ataïr, Aldé-

baran, Pollux, dont les satellites de 10e et 11e grandeur sont à des distances de 2',5, de 3',5 et de 2', ont été reconnues pour des couples optiques, par la comparaison des mouvements propres des composantes [1].

Arrivons au caractère le plus important, le plus décisif de l'existence des couples physiques dans les étoiles, c'est-à-dire au mouvement de circulation du satellite autour de l'étoile principale. Si, en effet, les composantes d'un couple sont réellement voisines, si leurs distances au système solaire sont à peu près égales, et si dès lors leur distance mutuelle n'est qu'une faible fraction des premières, les deux soleils voisins devront graviter l'un vers l'autre, décrire chacun une orbite fermée autour du centre de gravité commun. Ce mouvement se manifestera par un déplacement relatif des composantes, qui changeront simultanément de direction et de distance. De tels mouvements ont été constatés en effet; mais comme ils s'accomplissent avec lenteur, et que les variations dont il s'agit exigent des mesures délicates, faites pendant de longues années, il a fallu un certain temps avant que l'on pût formuler à cet égard des conclusions positives. C'est W. Herschel qui parvint le premier (de 1776 à 1804) à établir la réalité des révolutions et à en calculer approximativement la durée; mais il s'écoula encore un quart de siècle avant qu'on réussît à déterminer avec précision les éléments d'une des orbites. La première orbite calculée (1829) fut celle de l'étoile double ξ de la Grande-Ourse, et c'est à un jeune et savant astronome français, Savary, qu'en revint la gloire [2]. Trois ans après

1. Deux mouvements propres, égaux et de sens contraire, tels que ceux des composantes de l'étoile double de la Girafe 684 Σ, peuvent, d'après Otto Struve, indiquer une connexion physique; les deux masses à peu près égales se meuvent alors en sens contraire autour du centre de gravité commun.

2. La *Connaissance des temps pour* 1830 contient le Mémoire important où Savary expose sa méthode pour calculer les orbites des étoiles doubles,

Savary, Encke détermina les éléments du système binaire de l'étoile 30 *p* Ophiucus. Puis vinrent successivement les systèmes ζ Hercule, η Couronne boréale, Castor, γ Vierge, ζ Écrevisse, α Centaure. Yvon Villarceau, J. Herschel, Mædler, Hind, Jacob sont les noms des savants géomètres qui se livrèrent à ces recherches importantes en indiquant des méthodes nouvelles, les unes analytiques, les autres géométriques, pour le calcul des orbites d'étoiles doubles.

Entrons dans quelques détails sur les systèmes binaires les mieux connus. Nous donnerons ensuite un tableau qui résumera les éléments principaux de quelques autres.

ξ *de la Grande-Ourse* est une étoile de 4e grandeur située sur les limites de la constellation, près du Petit-Lion. Les deux composantes sont l'une de 4e, l'autre de 5e grandeur. L'orbite trouvée par Savary était basée sur trois observations de W. Herschel en 1781, 1803 et 1825, et une de Struve en 1820. La durée de la révolution était indiquée de 58 ans $\frac{1}{4}$. Depuis, Mædler, Yvon Villarceau, J. Herschel l'ont à nouveau calculée en partant d'observations plus nombreuses, et ont respectivement trouvé : 61a.3, 61.576, 60.720, de sorte que la période de 61 années peut être considérée comme une moyenne très-approchée. En 1842, une révolution complète s'était écoulée depuis les premières observations d'Herschel, et la seconde, qui se terminera en 1903, est aujourd'hui à plus de moitié accomplie. L'étoile satellite est passée au périhélie (ou périastre) en avril 1876.

70 *Ophiucus* ou *p du Serpentaire* est une étoile de 4e grandeur, dont les composantes sont de grandeur 6.5 et 7.5. Encke trouva 73a.862 pour la durée de la révolution. Depuis, Villarceau, J. Herschel, Mædler, Powell ont obtenu 92.338,

basée sur quatre observations complètes, c'est-à-dire sur quatre observations où l'angle de position et la distance du satellite ont été mesurés à des intervalles de temps suffisants. Une note donne en outre l'application de cette méthode à ξ Grande-Ourse.

80.340, 92.870 et 98.146. La moyenne probable est de 91 à 92 ans.

ζ Hercule est un des systèmes binaires dont la période de révolution est la plus courte. Mædler, Y. Villarceau, Plummer, Flechter ont calculé des orbites dont la période, en années sidérales, est 31.468, 36.357, 36.606, 37.21. C'est une étoile

Fig. 277. Orbite apparente de ζ d'Hercule. Positions observées et positions calculées du satellite, d'après Yvon Villarceau.

de 3[e] grandeur, dont le satellite est de 6.5. Elle a présenté, vers 1793 et 1830, le phénomène intéressant d'une occultation apparente, le satellite étant venu, par son mouvement de révolution, se confondre dans les rayons de l'étoile principale[1].

1. Les orbites apparentes des étoiles doubles sont les seules qu'on observe : cela est de toute évidence. En joignant par un trait continu les différentes positions du satellite S S′ S″... mesurées par comparaison avec la principale E supposée immobile, on a l'orbite apparente, c'est-à-dire la projection de

η Couronne boréale, étoile de 5[e] grandeur, avec des composantes de 5.5 et 6, a une période d'environ 43 ans. Mædler, Villarceau, J. Herschel, Winnecke en ont calculé l'orbite et ont trouvé pour la durée de la révolution 42.500,



Fig. 278. Orbite réelle de ζ d'Hercule, rabattue sur le plan de l'orbite apparente, d'après Yvon Villarceau.

42.501, 44.242 et 43.677. La moyenne est d'un peu plus de 43 ans.

l'orbite réelle sur un plan perpendiculaire au rayon visuel. Si le plan de l'orbite coïncidait avec ce dernier, il y aurait identité entre les deux courbes; mais si, comme c'est le cas ordinaire, le plan de l'orbite vraie est incliné sur l'autre, c'est une courbe plus ou moins allongée que cette dernière, que donne l'observation. Enfin, si le rayon visuel est dans le plan ou très-voisin du plan de l'orbite vraie, l'orbite apparente est une ligne droite, le long de laquelle oscille le satellite. En 26 ans (1825-51) le satellite de l'étoile double 2760 Σ du Cygne n'a pas changé de direction, mais il s'est rapproché de l'étoile principale, de 14″.3 à 10″.9. Dans le cas d'une telle oscillation, le satellite doit paraître à deux reprises, par chaque révolution, coïncider avec

Les éléments de l'orbite de Castor sont moins concordants. On évaluait à 330 ans, au siècle dernier, sa période de révolution, que Mædler en 1847 portait à 520 ans. Hind et Jacob lui assignent 632.27 et 653.1 années, et enfin une détermination plus récente (1872) due à M. Thiele, lui donnerait une durée bien plus considérable, de 996 ans. Castor ou α Gémeaux est une étoile dont l'éclat (2.1) est compris entre la 2e et la 1re grandeur, et ses composantes sont de 2.7 et 3.7 grandeur. On a vu qu'un troisième satellite, plus éloigné, fait en réalité de ce groupe un système ternaire.

γ Vierge est aussi une étoile triple; mais les orbites calculées se rapportent aux deux composantes principales, toutes deux de 3e grandeur. Mædler, Y. Villarceau, J. Her-

l'étoile principale : il y a, comme pour les planètes Vénus et Mercure, conjonction inférieure ou conjonction supérieure. Mais cette disparition a lieu également lorsque, au périhélie apparent, le satellite est si voisin de la primaire que les lumières des deux étoiles se confondent. C'est ce dernier cas qui s'est présenté de 1793 à 1800, et vers 1829, pour le satellite de ζ Hercule (et celui de δ du Cygne), que W. Herschel avait observé en 1780, qu'il ne revit plus vingt ans plus tard, et que Struve parvint à revoir en 1828. On peut voir en effet, dans la figure 277, qu'à ces diverses époques le satellite était voisin de son périhélie apparent. L'étoile τ du Serpentaire a offert une semblable occultation à Struve; en 1827, le point lumineux affectait déjà une forme ovale et l'étoile parut de nouveau dédoublée en 1836.

W. Struve, en citant ces exemples remarquables, distingue trois formes particulières du phénomène : 1° celui d'étoiles qui, reconnues doubles d'abord, se sont tellement rapprochées qu'elles sont devenues insensiblement oblongues ou même parfaitement simples. Dans ce nombre se sont trouvées Atlas des Pléiades, η d'Hercule, ω du Lion, γ de la Couronne, γ de la Vierge, et l'étoile double 2173 du catalogue Σ (Struve); 2° le cas d'étoiles qui, simples antérieurement, sont devenues doubles, ou dont les composantes s'éloignent visiblement: telles sont τ du Serpentaire et 44 du Bouvier; 3° enfin celui où les deux phénomènes se sont trouvés réunis, et Struve en cite deux exemples : ζ d'Hercule, dont le satellite, dans l'espace de six ans, a disparu totalement et a reparu du côté opposé de la principale. L'étoile 42 Chevelure de Bérénice formait, de 1827 à 1829, un groupe binaire composé de deux étoiles presque de même grandeur; en 1833, l'étoile devint simple, même avec un grossissement de 1000 fois. En 1835, elle redevint oblongue, et en 1838, les composantes ont reparu séparées.

schel lui assignent une période de 169.44, 153.787, 182.12 années.

ζ Écrevisse est encore une étoile triple, présentant cette circonstance remarquable que les trois composantes ont presque le même éclat ; leurs grandeurs sont en effet 5.0, 5.7 et 5.3. Les deux premières, les plus rapprochées, ont une période d'environ 60 ans. Les périodes calculées par Villarceau, Mædler, Plummer, Winnecke et O. Struve sont presque égales : 58.59, 58.27, 58.23, 58.94 et 62.4 années. Nous

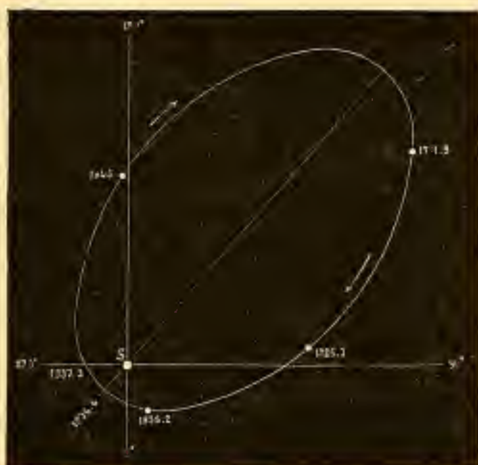


Fig 279. Orbite de l'étoile double γ de la Vierge, d'après J. Herschel.

reviendrons plus loin sur cette étoile considérée comme système ternaire.

Parlons encore de la belle étoile double α du Centaure, dont les composantes sont de 1re et de 2e grandeur, et dont la période est comprise entre 75 et 80 ans. Villarceau, Jacob, Powell et Hind en ont calculé les éléments ; ils en ont conclu les durées suivantes de la révolution : 78.486, 77.0, 76.25 et 81.40 années. (Passage au périhélie en 1875.)

Beaucoup d'autres systèmes binaires sont connus, et un assez grand nombre d'orbites ont été calculées. On vient

de voir par les chiffres qui expriment les durées des révolutions, dans les couples les mieux et les plus longtemps observés, qu'il ne s'agit encore que d'une approximation, laquelle est d'autant plus voisine de la vérité que les observations très-précises sont plus nombreuses, et que la portion de l'orbite parcourue depuis les premières recherches est une fraction plus grande de l'orbite entière. Quelques-unes ont achevé entièrement leurs révolutions sous nos yeux : nous l'avons dit déjà pour ξ Grande-Ourse; depuis 1780, *p* Ophiucus a achevé la sienne en 1872; ζ Hercule en a accompli plus de deux, et la troisième sera terminée en 1888. α Centaure a été reconnue comme double en 1709 par le P. Feuillée; vers 1900, elle aura achevé deux révolutions entières.

Les plus courtes périodes calculées sont, outre quelques-unes de celles que nous venons de donner, celles de l'étoile 42 de la Chevelure de Bérénice, d'environ 26 ans, et d'une étoile de l'Écrevisse (3121 Σ) qui est de 39 ans[1]. Les plus longues sont, outre la période de Castor, celle de γ Lion, 400 ans environ, de σ Couronne boréale, 600 à 800 ans, de ζ du Verseau, qu'on évalue à près de 1600 ans.

1. Voici, en tout cas, le tableau de dix-huit autres périodes à joindre à celles que nous avons déjà données :

Étoiles doubles.	Périodes.	Calculateurs.
ω Lion.	82 ans 5	Villarceau
	133.3	Klinkerfues.
3062 Σ Cassiopée	94.8	Mædler.
	147	Id.
ξ Bouvier	117.1	J. Herschel.
	168.9	Hind.
δ Cygne	178.7	Hind.
	280.6	Behrmann.
σ Couronne . . .	608.4	Mædler.
	736.9	Hind.
	843.0	Doberck.
	195.0	Jacob.
	240.0	Powell.

Étoiles doubles.	Périodes.	Calculateurs.
μ² Bouvier. . . .	649 ans 7	Hind.
	290.1	Doberck.
42 Bérénice.	25.7	O. Struve.
3121 Σ Écrevisse.	39.2	Fritsche.
η Cassiopée.	176.0	Doberck.
36 Ophiucus.	200.0	Smyth.
1757 Σ Vierge.	240.0	Id.
τ Serpentaire.	217.9	Doberck.
1938 Σ Bouvier.	314.4	Hind.
36 Andromède.	349.1	Doberck.
γ Lion.	402.6	Id.
ζ Verseau.	1578.0	Id.

Mais ces chiffres ne doivent être acceptés qu'avec une grande réserve, parce que la portion d'orbite observée est encore beaucoup trop petite pour qu'on puisse calculer des éléments exacts.

Humboldt évaluait à 650 le nombre des couples physiques sur le total de 6000 étoiles doubles connues à l'époque où il écrivait. Le calcul des probabilités, d'après Struve, en indique une proportion bien plus grande, qu'on peut appliquer aujourd'hui à un nombre d'étoiles doubles encore plus considérable, puisqu'on a vu qu'il dépasse 10000. Mais, si au lieu de baser une telle évaluation sur des conjectures, on veut n'admettre parmi les couples physiques que ceux où l'observation a positivement reconnu les mouvements des composantes, on arrive encore à un total remarquable. Un catalogue des systèmes binaires publié par Chambers, ne comprenait pas moins de 166 couples physiques parmi lesquels il y a 111 systèmes reconnus, et 55 systèmes douteux ou soupçonnés; on connaît en outre 5 systèmes ternaires qui sont : ζ Écrevisse, 51 Balance, σ Couronne boréale, 2 Petit-Cheval et 2434 Σ. Il faut y joindre Castor, au moins comme système ternaire soupçonné. Une liste plus complète, de MM. Wilson et Gledhill, renferme 449 systèmes binaires. Ce nombre est naturellement destiné à s'accroître, à mesure que le temps, en s'écoulant, permettra aux nouvelles observations de décider de la réalité des mouvements les plus lents.

En attendant, on peut déjà se faire une idée de la variété des orbites, par les durées si inégales des révolutions. Tandis que certaines d'entre elles s'accomplissent en des temps comparables à ceux des planètes les plus éloignées du Soleil, Saturne, Uranus, Neptune (il y a dans l'énumération précédente 13 systèmes qui n'ont pas 200 ans de révolution); d'autres, au contraire, paraissent se compter par siècles et dépasser de beaucoup les durées des révolutions planétaires. Les sys-

tèmes de Castor, de 61 Cygne[1], de μ^2 Bouvier, de γ Lion, de σ Couronne sont dans ce cas.

Il y a, d'ailleurs, d'autres différences plus caractéristiques entre les orbites des étoiles doubles et celles des planètes de notre monde solaire. Leur excentricité notamment est généralement plus forte que celle des planètes; elle est considérable dans quelques-unes, et les rapproche ainsi, au point de vue de la forme, des orbites cométaires[2]. Mercure a pour excentricité 0.205, et la plus elliptique des orbites planétaires connues, celle de Libératrix (125), 0.347. On voit donc, en se reportant au tableau que nous donnons en note, que, parmi les orbites calculées des étoiles doubles, deux seulement sont moins allongées que cette dernière, quoique plus excentrique encore que l'orbite de Mercure. La moins excentrique des

1. La difficulté de déterminer les périodes dont la durée est considérable est inhérente à la lenteur du mouvement angulaire du satellite par rapport à l'étoile principale. Un exemple frappant de cette difficulté est donné par les composantes de 61 Cygne. La période évaluée à 452 ans, puis à 333 ans, est devenue tout à fait incertaine, et il semble même aujourd'hui (d'après O. Struve et M. Wilson) que le mouvement relatif, au lieu d'être orbital, soit rectiligne. Mais cela peut tenir à la grande obliquité du plan de l'orbite réelle, en même temps qu'à la grande durée de la période.

2. On peut s'en rendre compte dans le tableau suivant, où nous donnons l'excentricité et le demi-grand axe apparent, en regard de la période de révolution.

Systèmes binaires.	Demi-grands axes	Excentricités.	Périodes.
ξ Grande-Ourse	2″.44	0.4315	61ans.6
70 *p* Ophiucus.	4 .97	0.4445	92.3
ζ Hercule	1 .25	0.4482	36.4
η Couronne	0 .96	0.2865	43.7
Castor.	6 .30	0.2405	632.3
	8 .09	0.7582	252.7
ζ Écrevisse	0 .93	0.3662	58.6
α Centaure.	12 .13	0.7187	78.5
σ Couronne	3 .92	0.6998	608.4
	2 .94	0.3887	240.0
ω Lion.	0 .86	0.6434	82.5
γ Vierge.	3 .58	0.8795	182.1



LE CIEL DE L'HORIZON DE PARIS

Côté Sud, vu à Minuit le 22 Septembre (Equin. d'Automne)

E. Guillemin et Ph. Benoist del.

Imp. Fraillery à Paris

orbites des comètes périodiques est celle de Faye (0.555); la comète d'Encke a pour excentricité 0.847. Donc, quatre des orbites précédentes, celles de γ Vierge, α Centaure, σ Couronne et ω Lion, sont tout à fait comparables sous ce rapport aux orbites cométaires.

Mais quelles sont les dimensions réelles de ces orbites? C'est à quoi il n'est possible de répondre aujourd'hui, d'une façon un peu précise, que pour α Centaure, 70 Ophiucus, seules étoiles dont la parallaxe soit mesurée parmi les précédentes, ou encore pour la 61ᵉ Cygne, si l'on admet la période de 452 ans. Pour α Centaure, la distance moyenne des composantes est un peu plus de 13 fois la distance du Soleil à la Terre; elle est comprise entre les rayons des orbites d'Uranus et de Saturne. Mais, à leur aphélie, les deux soleils s'éloignent jusqu'à la distance 22.6, et à leur périhélie, ils ne sont plus éloignés que de 3.7 rayons; la première distance est 6 fois aussi grande que l'autre, et l'on se rend compte, de cette façon, de l'énorme excentricité de l'orbite.

Les deux étoiles de la 61ᵉ du Cygne ont une moyenne distance de 41 rayons de l'orbite de la Terre; c'est plus d'une fois et un tiers la distance de Neptune au Soleil, ou 6 milliards 150 millions de kilomètres.

Enfin, les composantes de l'étoile 70 d'Ophiucus sont à peu de chose près à la distance de Neptune au Soleil, si la parallaxe 0″.162 calculée par M. Krüger est exacte[1]. Cette distance oscille d'ailleurs entre 43.335 à l'aphélie, et 16.665 au périhélie, ou bien entre 6 milliards 400 millions et 2 milliards 470 millions de kilomètres.

1. « Plusieurs circonstances réunies, dit M. Yvon Villarceau, font de l'étoile *p* Ophiucus la plus intéressante peut-être des étoiles doubles de notre ciel boréal. La durée de sa révolution, actuellement bien connue, n'excède pas d'un dixième celle d'Uranus. Les grandes dimensions de l'orbite apparente, l'éclat des deux composantes et la rapidité du mouvement propre portent à considérer ce système comme étant probablement l'un des plus voisins de notre système solaire.... » (Comptes rendus, 1851.)

Pour les autres systèmes, dont la parallaxe est inconnue, les dimensions réelles des orbites sont pareillement ignorées, à moins qu'on ne prenne hypothétiquement pour distances les moyennes qui correspondent à leurs grandeurs respectives. Nous avons fait ce calcul pour les systèmes du tableau précédent ; les moyennes distances ainsi obtenues sont :

Systèmes binaires.	DISTANCES DES COMPOSANTES en rayons de l'orbite terrestre.	en millions de lieues.
ζ Hercule	16	592
η Couronne	26	962
Castor	54 ou 70	1998 ou 2590
σ Couronne	105 ou 80	3885 ou 2960
γ Vierge	47	1369
ξ Grande-Ourse	45	1295
ζ Écrevisse	25	925
ω Lion	36	1332

Le rayon de l'orbite terrestre étant pris pour unité, on voit que trois des distances moyennes (celles de ζ Hercule, ζ Écrevisse et η Couronne) se trouveraient comprises dans l'intérieur de l'orbite de Neptune ; les cinq autres la dépasseraient pour atteindre jusqu'à trois fois et demie la distance de cette planète au Soleil, plus de quatre milliards de lieues ! Mais les parallaxes de ces systèmes étant inconnues, ces nombres sont hypothétiques, et il est probable qu'ils sont au-dessous de la réalité.

Le mouvement de révolution de deux soleils, c'est-à-dire de deux corps brillants d'une lumière qui leur est propre, n'a rien de plus extraordinaire que celui d'une planète ou d'un corps obscur autour d'un Soleil. Un état physique particulier, tel que celui de l'incandescence des corps en mouvement, n'a rien d'incompatible avec les lois connues de la mécanique, ne modifie en rien les mouvements réciproques des astres en présence. Il est possible qu'à l'origine de notre

monde solaire, plusieurs des planètes, aujourd'hui obscures, aient brillé comme le Soleil, et qu'ainsi notre système, qui maintenant est une étoile simple, ait pu être considéré jadis comme une étoile double ou même multiple.

C'est aussi l'analogie qui nous entraîne à supposer dans les systèmes stellaires des agglomérations semblables à celles de notre monde. Nous considérons volontiers chaque étoile comme un soleil entouré de corps plus petits, d'astres obscurs gravitant autour de lui, comme les planètes et les comètes gravitent autour de notre Soleil. Si cela n'existe point d'une façon absolument générale, du moins il est fort probable qu'il en est ainsi pour un grand nombre d'étoiles; et rien n'empêche d'étendre l'hypothèse au cas des systèmes binaires ou multiples. Imaginons donc que les deux composantes d'une étoile double sont accompagnées chacune de comètes, de planètes et de leurs satellites, et essayons de nous faire une idée des mouvements relatifs de tous ces corps. Cela n'est rien moins que facile, du moins si l'on introduit dans l'hypothèse l'idée de la stabilité du système, et si l'on compare les perturbations considérables que les rapprochements périodiques de deux masses solaires doivent produire dans les orbites planétaires, avec celles relativement faibles qui ont été constatées dans les mouvements des corps de notre système. D'après sir J. Herschel, une telle stabilité n'est concevable que dans les systèmes binaires dont les composantes sont très-éloignées et les périodes de révolution fort longues. De plus, il faut admettre que les planètes de chacun de ces soleils sont accumulées dans des espaces relativement petits en comparaison de l'énorme intervalle qui sépare les deux composantes, à peu près dans la proportion où les distances de nos planètes principales à leurs propres satellites se trouvent par rapport aux distances des planètes au Soleil lui-même. « Une subordination moins nettement caractérisée, dit-il, serait incompatible avec la stabilité de leurs systèmes et avec la nature pla-

nétaire de leurs orbites. A moins d'être intimement nichées sous l'aile protectrice de leur supérieur immédiat, le passage de l'autre soleil au périhélie de leur propre soleil, pourrait les enlever, ou du moins les faire circuler dans des orbites absolument incompatibles avec les conditions nécessaires à l'existence de leurs habitants. Il faut avouer qu'il y a là un champ étrangement vaste et nouveau pour les excursions spéculatives. » (*Outlines of astronomy*, 6e édition.)

Mais il ne faut pas oublier qu'une hypothèse domine toutes les recherches qui ont été faites sur les systèmes d'étoiles doubles ou multiples, comme aussi les spéculations auxquelles nous venons de faire allusion. Cette hypothèse, c'est que, dans leurs mouvements réciproques autour du centre de gravité, les composantes d'un système sont assujetties aux lois du mouvement elliptique, aux lois de Képler, et, en un mot, sont régies, comme les corps du système solaire, par la force de gravitation. Les méthodes analytiques données par Savary, par Yvon Villarceau, par Encke reposent sur ce point de départ, et les éléments trouvés pour les orbites relatives ont été calculés suivant les principes de la mécanique céleste. Une telle induction est-elle légitime? C'est là une question philosophique d'une haute importance, et qui ne peut être tranchée à la légère, ni résolue par de vagues analogies[1].

1. Nous renvoyons le lecteur désireux de se faire une idée exacte des conditions rigoureuses du problème en question, aux mémoires publiés dans la *Connaissance des Temps pour* 1852, par M. Y. Villarceau, et notamment à sa *quatrième note sur les étoiles doubles*, où l'éminent astronome étudie *le mouvement des étoiles doubles, considéré comme propre à fournir la preuve de l'universalité des lois de la gravitation planétaire*. Nous devons nous borner à transcrire ici les conclusions de l'auteur, qui, comme il le dit lui-même, n'a point eu l'intention d'élever l'ombre d'un doute sur l'universalité de ces lois, mais de montrer la différence, si importante au point de vue de la philosophie scientifique, entre une *probabilité*, si forte soit-elle, et une *preuve acquise*. Voici ces conclusions : « Bien qu'il résulte des recherches des astronomes, que le mouvement observé dans les systèmes binaires ne se soit jusqu'ici montré nulle part en opposition avec

Ce que l'on peut dire en faveur de la probabilité de l'universalité de la loi de gravitation, c'est que, des orbites d'étoiles doubles qui ont été déterminées avec une approximation suffisante, on a déduit des éphémérides, à l'aide desquelles l'observation ultérieure a pu vérifier, dans une certaine mesure, l'exactitude des éléments. De même, quatre ou cinq observations ayant suffi pour le calcul, il a été possible de voir si les autres observations déjà connues venaient cadrer avec les résultats obtenus. Or, jusqu'à présent, ces deux genres de vérifications ont paru concordantes dans la limite des erreurs d'observation. De sorte qu'on peut admettre, sauf les réserves indispensables en des questions si difficiles, que les corps des mondes sidéraux sont gouvernés dans leurs mouvements par les mêmes forces qui agissent sur les corps dont se compose le monde solaire.

les lois de la pesanteur, nous n'avons cependant pas encore le droit de conclure que cette loi régit effectivement les mouvements des étoiles doubles, comme elle régit les mouvements planétaires. Les observations d'étoiles doubles ne peuvent pas fournir une preuve expérimentale de l'universalité des lois de la pesanteur, mais seulement de puissantes probabilités, qui semblent commencer à se produire. » Nous engageons nos lecteurs à méditer ces sages réserves d'un savant aussi versé dans la théorie que dans la pratique de la haute astronomie, et à les mettre en regard des assertions tranchantes, émises trop souvent sur des sujets pareils, avec une légèreté que l'ignorance et l'inexpérience de leurs auteurs n'excusent point; ceux qui aiment à formuler ainsi en phrases pompeuses et poétiques une foule d'hypothèses invérifiables, ne semblent avoir d'autre but que de se donner un faux air de profondeur. La vraie science n'a point de telles allures.

La *Connaissance des Temps pour* 1877 renferme aussi, de notre savant compatriote, M. Y. Villarceau, un mémoire où se trouve exposée, avec tous ses développements analytiques, sa *Méthode pour calculer les orbites des étoiles doubles*. Nous saisissons cette occasion pour nous associer à l'hommage que l'auteur rend à la mémoire de Mme Y. Villarceau, qui a vérifié elle-même l'exactitude analytique des formules de ce grand travail, et en a calculé plusieurs applications numériques. Nous croyons, comme lui, « qu'il est utile d'augmenter la liste encore peu nombreuse des femmes, qui, par leur collaboration active et dévouée, ont contribué aux progrès de la science, » et que les astronomes ajouteront le nom de Mme Yvon Villarceau aux noms de Mmes Lepaute, Caroline Herschel et miss Mitchell.

§ 3. SATELLITES DE SIRIUS ET DE PROCYON. — SYSTÈMES TERNAIRES.

Les perturbations de la planète Uranus ont conduit les géomètres à la découverte de la planète troublante, Neptune; celles de Mercure paraissent devoir rendre décisive une semblable conquête dans les régions les plus voisines du Soleil. Ce sont là de grandioses conséquences de la théorie. Eh bien, le génie de Bessel a fait, dans les profondeurs de l'univers sidéral, ce que les Le Verrier et les Adams ont fait dans la région relativement limitée du monde planétaire. Des perturbations observées dans les positions et les mouvements de Sirius, ont conduit le grand astronome de Kœnigsberg à soupçonner la présence d'un corps troublant que le télescope n'avait pu révéler encore, et que, pour cette raison, il considérait comme un astre obscur, de nature planétaire. En 1851, Peters discuta, d'après les vues de Bessel, un grand nombre d'observations de Sirius, et ce savant en conclut que les variations périodiques reconnues s'expliqueraient, si l'on admet que l'étoile décrit en 50 ans une ellipse dont le demi-grand axe, vu de la Terre, sous-tendrait un angle supérieur à 2″.4.

Onze ans plus tard, un astronome américain, M. Clarck, se servant d'une nouvelle et puissante lunette de 47 centimètres d'ouverture, aperçut le compagnon de Sirius dont l'angle de position et la distance s'accordaient avec l'orbite calculée par Peters. J. Chacornac à Paris, Lassell à Malte, voyaient à leur tour, un ou deux mois après Clarck, l'astre deviné par Bessel; ce n'était donc point un corps obscur, ainsi que l'impossibilité de rien voir jusqu'alors l'avait fait soupçonner au célèbre astronome.

Une découverte semblable a été faite sur Procyon. L'étude du mouvement de cette belle étoile, d'après de nombreuses

observations d'Europe et d'Amérique, a conduit le docteur Auwers à représenter ses variations de position par une orbite à peu près circulaire, que Procyon décrirait en près de 40 années (39ª.866) dans un plan perpendiculaire au rayon visuel, le rayon de l'orbite étant égal à 0″.98. Or, le compagnon jusqu'alors inconnu, dont l'action avait produit les perturbations observées, a été découvert par O. Struve, et observé en 1873 et 1874.

Cette vérification, par l'observation, de l'existence d'astres jusqu'alors inconnus, existence démontrée et prévue par la seule théorie, est de la plus haute importance. En effet, les recherches de Bessel, de Peters et d'Auwers étaient également basées sur l'hypothèse, que les lois de la gravitation sont les mêmes dans les systèmes sidéraux que dans le système solaire, et qu'ainsi les corps voisins exercent les uns sur les autres des attractions qui leur font décrire, en suivant les lois de Képler, des orbites elliptiques autour de leur centre de gravité commun. Il y a donc à répéter ici ce que nous avons dit en parlant des orbites des autres étoiles doubles. Si les positions successives des satellites d'abord supposés, puis découverts, s'accordent avec celles que donne la théorie, l'hypothèse se trouve justifiée. Or, jusqu'à présent, un tel accord peut être regardé comme réel, dans les limites des erreurs que l'on commet nécessairement dans des mesures si délicates et si difficiles. Sous ces réserves, il est donc permis de regarder comme réalisé l'espoir que W. Struve exprimait, il y a trente ans, dans son remarquable Mémoire sur les étoiles doubles : « Si les lois de la gravitation universelle, disait-il, sont la plus sublime découverte qu'ait faite l'esprit humain dans le cours de plusieurs milliers d'années, nous sommes bien près d'être à même de déterminer si ces lois n'appartiennent qu'au système solaire, ou si elles sont communes à l'univers entier. L'astronomie marche donc vers une nouvelle époque où l'on fera voir que la mécanique céleste ne se borne pas aux

phénomènes du système solaire, mais peut s'appliquer aux mouvements des étoiles fixes. » (*Rapports sur les mesures micrométriques d'étoiles doubles*, etc.)

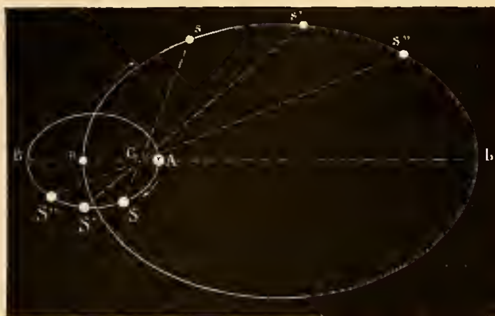


Fig. 280. Orbites décrites par les composantes d'un système binaire autour du centre de gravité commun. (Rapport des masses = 3 : 1.

Si la gravitation régit les systèmes d'étoiles doubles et multiples, il en résulte une conséquence d'un grand intérêt. On doit pouvoir calculer la masse des étoiles dont la distance est connue, en la comparant à celle de notre propre Soleil. Parmi les systèmes dont les éléments sont calculés et dont les parallaxes sont déterminées, nous en trouvons quatre, Sirius, la 61e du Cygne, α du Centaure et *p* d'Ophiucus, dont il est possible d'évaluer approximativement la masse[1]. On trouve ainsi que les deux étoiles de 61e Cygne ont ensemble un peu plus du tiers de la masse du Soleil (0.349), en admettant 0″.374 pour la parallaxe et 452 ans pour la période de révolution. En supposant, comme la presque égalité



Fig. 281. Orbites décrites par les composantes d'une étoile double, autour du centre de gravité du système. (Rapport des masses = 13 : 1, comme dans le cas de Procyon.)

1. La formule qui donne la somme des masses des composantes relativement à la masse du Soleil est $\frac{m+m'}{M}=\frac{1}{T^2}\cdot\frac{A^3}{\pi^3}$, T étant la période de révo-

de leur éclat l'autorise, qu'elles sont toutes deux de mêmes dimensions et de même masse, chacune d'elles est la sixième de la masse solaire. Les masses réunies des deux composantes d'α Centaure sont égales à 0.395, près des quatre dixièmes de la masse du Soleil. Ces deux systèmes sont donc, sous ce rapport, inférieurs au nôtre. Il n'en est pas ainsi de 70 *p* Ophiucus ; en admettant la parallaxe trouvée par Krüger 0″.162, ce magnifique système aurait pour masse 3.4, près de trois fois et demie autant que le Soleil. Sirius serait un peu moindre et sa

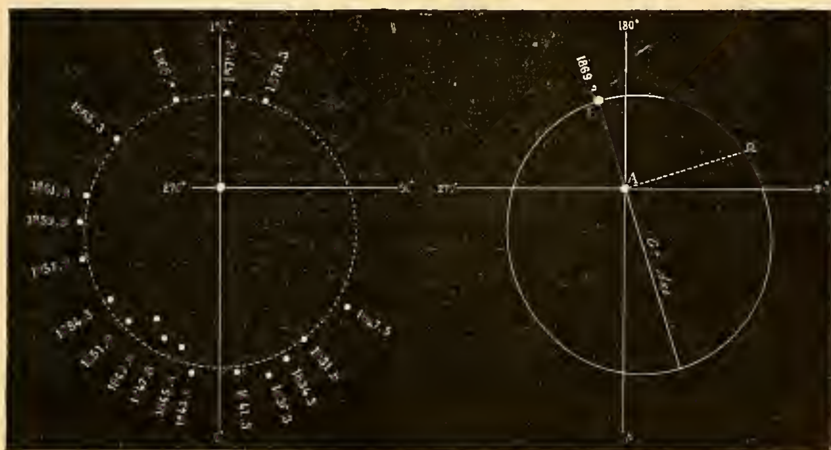


Fig. 282. Orbite apparente et orbite réelle de ζ Écrevisse, d'après M. O. Struve.

masse équivaudrait à 3.125, d'après les calculs de M. Wilson.

A la vérité, on ne connaît ainsi que la somme des masses des composantes. Pour avoir celles de chacun des soleils d'un système, il faudrait connaître les orbites vraies, c'est-à-dire celles décrites autour du centre de gravité. Or, on ne cherche généralement que l'orbite relative du satellite autour de la principale. Pour Procyon, ces orbites sont connues ; on sait que l'étoile principale décrit en 40 ans un cercle de 0″.98 de rayon, et que le satellite est à une distance treize fois plus

lution exprimée en années, A et π le demi-grand axe et la parallaxe, exprimés en secondes d'arc ; m et m' sont les masses des deux étoiles, et M la masse solaire, ou mieux la somme des masses du Soleil et de la Terre.

grande. De sorte que, la masse de Procyon étant 80, celle du satellite est 7. En revanche, la parallaxe étant inconnue, on ne connaît point la masse totale rapportée au Soleil.

M. O. Struve a donné d'intéressants détails sur le système

Fig. 283. Système ternaire de ζ Écrevisse. Perturbations du satellite des deux étoiles principales, d'après O. Struve.

ζ Écrevisse, dont on a vu plus haut la période de révolution. La figure 282 représente, d'après cet astronome, l'orbite apparente et relative décrite par le satellite autour de l'étoile principale. On voit, par les positions de celui-ci dans la suite des années, comparées à celles de l'orbite conclue, quels

écarts restent entre la théorie et l'observation. La même figure donne l'orbite réelle déduite de l'orbite apparente. Mais ζ Écrevisse n'est pas seulement une étoile double: c'est en réalité un système ternaire, puisqu'une troisième étoile beaucoup plus éloignée que les deux premières, gravite également autour du centre de gravité commun. M. Struve a tracé l'orbite de cette troisième composante (rapportée au centre optique des deux autres, qui diffère peu sans doute du centre de gravité) et il a trouvé, au lieu d'une courbe unique, une série régulière de sinuosités qui dénotent avec certitude l'existence de fortes perturbations. Quelle est la cause de ces perturbations? L'astronome russe croit qu'il faut les attribuer à l'existence d'un corps, satellite encore inconnu du système. Arrivera-t-on à distinguer cet astre perturbateur, comme on l'a fait pour Sirius et Procyon? Est-ce cette fois un corps planétaire, obscur, qu'on ne pourra voir évidemment à cette distance? C'est ce qu'il est difficile de deviner. Sir J. Herschel avait raison de dire, ainsi qu'on l'a vu plus haut, que la spéculation a beau jeu pour imaginer, dans des systèmes solaires aussi complexes, les conditions d'équilibre des corps qui les composent.

§ 4. GROUPES D'ÉTOILES VISIBLES A L'ŒIL NU. — LES PLÉIADES. LES HYADES. — PRŒSEPE. — PERSÉE.

Les étoiles visibles à l'œil nu sont-elles disséminées au hasard sur la voûte céleste? N'y a-t-il, entre les plus voisines en apparence, aucune connexion réelle ou physique qui permette de les ranger en groupes naturels?

Ces questions sont déjà en partie résolues par ce qu'on sait des systèmes d'étoiles doubles et multiples. Bientôt, en explorant les régions du ciel visibles dans les télescopes, nous aurons à passer en revue une multitude d'associations stellaires,

dans lesquelles les soleils se trouvent si pressés, si nombreux, et forment des figures si régulières, qu'il est impossible de nier leur dépendance réciproque. Mais, bien avant la découverte de ces îles, de ces archipels de mondes semés avec une profusion si étonnante dans l'infini, la vue simple distinguait un certain nombre de groupes dont les étoiles composantes sont assez rapprochées, pour qu'on ne puisse élever de doute sérieux sur le lien qui les unit. Tel est, par exemple, le groupe des Pléiades. Tels sont encore les groupes connus sous les noms d'Hyades, de Prœsepe ou de la Crèche, de la Chevelure de Bérénice, de Persée. Tous sont visibles à l'œil nu, et les bonnes vues distinguent avec facilité les principales étoiles des Hyades, des Pléiades et de la Chevelure de Bérénice. Argelander, dans son catalogue des étoiles visibles à l'œil nu sur l'horizon de Berlin, inscrit 15 *cumuli* ou amas d'étoiles, que distingue la vue simple; Heis en compte 4 de plus, ou 19; mais, à part ceux dont nous venons de parler, tous exigent de fortes lunettes pour être décomposés en étoiles. Nous les retrouverons en décrivant les nébuleuses.



Fig. 284. Les Pléiades, d'après l'Atlas céleste de Harding.

Voici d'abord (fig. 284) les Pléiades, situées dans la constellation du Taureau, que l'on distingue si aisément au nord-ouest d'Orion et d'Aldébaran. Sur près de six cents étoiles environ qui forment ce groupe (on en comptait au plus 80 au dernier siècle), six sont visibles sans le secours des lunettes. Il paraît certain que jadis on en voyait sept, ce



LES PLÉIADES

D'après la carte dressée par M. C. Wolf

comprenant les 571 étoiles de 3e à 13e grandeur visibles à l'aide d'un télescope de 31 centimètres d'ouverture.

qui semble prouver que l'une d'elles est variable et a diminué d'éclat, ou bien a disparu. Les vues très-perçantes, comme celle de M. Heis, en voient jusqu'à dix, quand le ciel est très-pur.

La plus brillante du groupe, Alcyone, est de troisième grandeur; Électre et Atlas sont de quatrième; Mérope, Maïa et Taygète, de cinquième. Trois autres encore ont reçu des noms particuliers, bien qu'elles soient au-dessous de la limite de visibilité simple : ce sont Pléione, Cœleno et Astérope, de sixième et huitième grandeur. Toutes les autres enfin ne sont visibles qu'à l'aide de lunettes d'une certaine puissance; mais avec une simple longue-vue, il est déjà possible d'en distinguer un grand nombre.

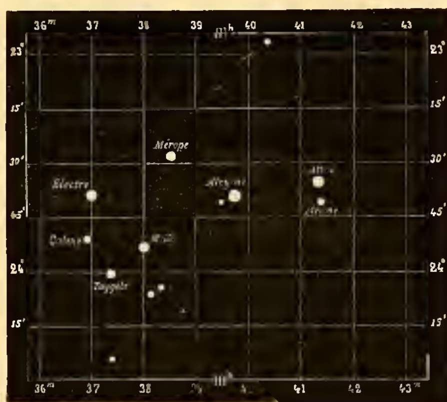


Fig. 285. Carte des 13 principales étoiles des Pléiades.

La planche XLIII est la reproduction, à échelle réduite, d'une carte des Pléiades dressée par notre savant compatriote, M. C. Wolf. Résultat précieux d'une série d'observations faites en 1873, 1874 et 1875, cette carte renferme toutes les étoiles visibles à l'aide d'un télescope de 31 centimètres d'ouverture. Elle est accompagnée d'un catalogue où toutes les positions des étoiles sont données au 10e de minute d'arc, d'un second catalogue de 53 étoiles principales (celles de Bessel) déterminées en grandeur et en position, et ne renferme pas moins de 571 étoiles comprises entre la 3e et la 14e grandeur. Nous y reviendrons plus loin, lorsqu'il sera question des étoiles variables, et de la spectroscopie stellaire. Pour le moment, nous ne devons pas passer sous silence les conclusions tirées par M. Wolf de la comparaison des positions des 53 étoiles de

Bessel, avec celles qu'il a lui-même trouvées, et qui accusent un lieu physique entre la plupart des étoiles du groupe[1].

Dans nos campagnes, les Pléiades[2] sont connues sous le nom de la *Poussinière*, sans doute parce qu'Alcyone apparaît dans le groupe, comme une poule entourée de ses poussins.



Fig. 286. Les Hyades, groupe de la constellation du Taureau, d'après Harding.

Les *Hyades*, qui sont voisines des Pléiades, forment un groupe d'étoiles moins nombreuses et moins pressées que celles-ci. La lumière éclatante d'Aldébaran, qui est, on le sait, de première grandeur, les rend plus difficiles à distinguer à l'œil nu. Elles apparaissent dans la saison des pluies. De là

1. Voici les propres termes dans lesquels M. Wolf formule ces conclusions : « Les étoiles des Pléiades paraissent former un groupe dont les membres sont physiquement liés les uns aux autres, et de plus il paraît exister dans ce groupe un déplacement relatif des étoiles, qui entraîne la plupart d'entre elles en sens contraire du mouvement diurne, en diminuant un peu leur distance polaire. Ce mouvement vers le nord-est est surtout marqué pour les étoiles situées dans la région nord-est de la carte, et où il atteint près de $0^s.2$ en ascension droite. Quelques étoiles seulement semblent animées d'un mouvement différent ; mais, en général, ou bien il est très-petit, ou bien il affecte des étoiles qui constituent des groupes dont les éléments très-voisins semblent tourner l'un autour de l'autre. La petitesse des déplacements d'une part, de l'autre le petit nombre des étoiles observées par Bessel avec une précision suffisante ne permettent encore de présenter ces conclusions que comme des conjectures, quant au sens et à la grandeur des mouvements ; mais, dès aujourd'hui, il est certain que des déplacements relatifs se sont produits dans les Pléiades. »

2. Les poëtes anciens les nommaient aussi Hespérides ou Atlantides. Quant au nom de Pléiades, on s'accorde à lui donner pour étymologie le mot grec πλεῖν, qui signifie *naviguer*, parce que, selon Lalande, au prin-

leur nom d'Hyades, d'un mot grec qui signifie pleuvoir. La liaison des étoiles qui composent ce groupe n'est pas aussi frappante que dans les Pléiades. Néanmoins il paraît difficile d'admettre qu'elles soient tout à fait indépendantes. En examinant la position des Pléiades et des Hyades dans le voisinage de la Voie Lactée, en observant que ces deux agglomérations sont situées toutes deux dans le prolongement d'un rameau de la grande zone, on arrive à les considérer comme deux amas d'étoiles appartenant à l'immense strate stellaire qui nous entoure, et dans le sein de laquelle on verra que le Soleil est lui-même plongé.



Fig. 287. Præsepe, groupe d'étoiles de la constellation de l'Écrevisse.

Dans la Chevelure de Bérénice, la plupart des étoiles du groupe sont visibles à l'œil nu, et se distinguent parfaitement dans le ciel, un peu à l'est du Lion. Aucune étoile très-brillante, il est vrai, ne gêne la vue, en effaçant leur éclat par son voisinage.

Les deux groupes suivants, l'un situé dans le Cancer et connu sous le nom de *Præsepe* ou de la *Crèche*, l'autre dans Persée, sont visibles à la vue simple ; mais il est impossible d'en distinguer les composantes sans le secours des lunettes.

temps et vers l'époque où elles se levaient avec le Soleil, commençaient les grandes navigations dans la Méditerranée. D'autres disent que ces étoiles étaient redoutées des marins à cause des pluies et des orages qui semblaient s'élever avec elles, et qu'ils attribuaient à leur influence.

Toutefois un instrument d'une médiocre puissance les décompose aisément, et ils prennent alors l'aspect qu'on leur voit dans les deux figures 287 et 288.

Les groupes que nous venons de décrire forment une transition entre les étoiles disséminées dans la voûte céleste et les amas plus condensés que leur aspect confus a fait désigner sous le nom général de nébuleuses.



Fig. 288. Groupe d'étoiles de la constellation de Persée.

Sans doute, si nous pouvions nous déplacer dans l'espace, et contempler d'un point suffisamment éloigné l'ensemble des étoiles visibles à l'œil nu qui nous semblent isolées, nous les verrions se rassembler, se condenser en un ou plusieurs groupes distincts analogues à ceux des Pléiades; s'il nous était possible, au contraire, de pénétrer au milieu d'un de ces amas si serrés, nous verrions les étoiles dont il est formé s'écarter et se disséminer sur la voûte céleste, et reproduire l'aspect général que nous connaissons à celle-ci.

Plus tard, nous reviendrons sur cette considération d'ensemble de l'Univers visible, et nous verrons quelle idée on doit se former de sa structure générale.

V

ÉTOILES VARIABLES

§ 1. ÉTOILES NOUVELLES, CHANGEANTES, DISPARUES.

Au point où nous en sommes arrivés de notre description, nous ne savons rien de la nature physique des étoiles, si ce n'est que ce sont des astres brillant d'une lumière qui leur est propre. Nous connaissons bien les distances de quelques-unes d'entre elles, les limites inférieures des distances des autres, nous savons qu'elles se meuvent dans les profondeurs de l'éther avec des vitesses égales ou même supérieures à celles des corps célestes de notre monde planétaire. Mais nous ignorons si ces soleils lointains sont ou non d'une constitution physique et chimique semblable à celle du Soleil, et si nous voulons arriver à quelques notions sur ce point intéressant, nous n'avons pour les interroger, vu leurs prodigieuses distances et l'impuissance relative des télescopes, qu'un seul élément, mais un élément précieux : leur lumière.

Pendant longtemps, tout ce qu'on a pu tirer d'une étude suivie des lumières stellaires, c'est, outre une classification approchée des étoiles selon leur éclat lumineux, quelques données sur la couleur de leur lumière. Cependant les astronomes, habitués à considérer les groupes ou constellations et les diverses étoiles dont elles sont formées, ont aussi, depuis

les temps les plus anciens, remarqué parmi quelques étoiles des variations d'éclat, signalé l'apparition subite d'étoiles jusqu'alors inconnues, et les disparitions de quelques autres. Les modernes ont fait plus; ils ont reconnu que ces variations sont assujetties parfois à des périodes régulières et ils en ont mesuré avec soin les durées.

Entrons dans quelques détails sur ces divers points.

On rapporte qu'on voyait jadis à l'œil nu, dans les Pléiades, une septième étoile[1] qui, ayant paru avant l'embrasement de Troie, puis s'étant effacée, a reparu de nouveau, pour devenir enfin invisible. Cassini cite plusieurs étoiles nouvelles : l'une, au rapport de Pline, fut observée par Hipparque 125 ans avant l'ère vulgaire; mais il paraît certain qu'elle avait un mouvement propre sensible, et que dès lors ce fut sans doute une comète; une autre parut au temps de l'empereur Hadrien; une troisième apparut dans l'Aigle l'an 389 de notre ère, devint aussi brillante que Vénus et dura ainsi trois semaines. Au neuvième siècle, une étoile se montra subitement dans le Scorpion; elle était si éclatante, qu'elle répandait, dit-on, autant de lumière que le quart du disque de la Lune. Enfin, en 945, en 1264, à peu près au même endroit du ciel entre Cassiopée et Céphée, on vit apparaître deux étoiles jusqu'alors inconnues[2]. Les étoiles de 1572, de 1600 et de 1604, qui

1. « Il est certain, dit Cassini, que quoique Homère, Attalus et Geminus n'en comptent que six, Simonides, M. Varron, Pline, Aratus, Hipparque et Ptolémée dans le texte grec, les mettent au nombre de sept, ce qui a été suivi de la plupart des astronomes, d'où l'on peut conjecturer que la septième a paru nouvelle à quelques-uns, à cause qu'elle ne se peut discerner que par les personnes qui ont la vue excellente. » Cette dernière réflexion de Cassini nous semble d'autant plus juste, qu'on sait aujourd'hui que plusieurs des Pléiades sont variables, et que des vues perçantes comme celles du docteur Heis distinguent à l'œil nu, dans le groupe, non pas seulement sept, mais dix étoiles.

2. Les catalogues chinois signalent aussi plusieurs apparitions extraordinaires d'étoiles nouvelles. Les chroniques du moyen âge parlent d'une étoile d'un éclat éblouissant qui parut en 1012 dans le Bélier.



LE CIEL AUSTRAL

INVISIBLES SUR PARIS.

Vues à Minuit le Decembre.

Guilemin et Sellier del. — Paris

eurent pour historiens Tycho-Brahé et Képler, et dont nous parlerons plus loin en détail, nous amènent aux observations modernes d'étoiles variables et d'étoiles temporaires. Nous allons successivement décrire ces phénomènes singuliers, en commençant par les étoiles dont la variabilité affecte une périodicité plus ou moins régulière.

§ 2. ÉTOILES VARIABLES PÉRIODIQUES.

Il y a, dans la constellation de la Baleine, une étoile marquée, sur les cartes, de la lettre grecque ο (omicron) et que les astronomes connaissent aussi sous le nom latin de *Mira Ceti*, la Merveilleuse de la Baleine. Découverte en août 1596 par David Fabricius, cette étoile est depuis longtemps remarquée, à cause des variations périodiques de son éclat. A chaque intervalle de onze mois, elle passe par les phases suivantes :

Pendant quinze jours, elle atteint et conserve son maximum d'éclat, qui en fait une étoile de seconde grandeur. Sa lumière décroît ensuite pendant trois mois, jusqu'à devenir complétement invisible non-seulement à l'œil nu, mais même dans les instruments[1]. Elle reste dans cet état pendant cinq mois entiers, après lesquels elle reparaît, pour croître d'une manière continue pendant trois autres mois. Sa période est alors achevée, et elle atteint de nouveau son maximum d'éclat, pour passer une seconde fois par les mêmes phases.

Ces variations singulières, signalées pour la première fois par Ph. Holwarda en 1637, sont connues depuis le milieu du dix-septième siècle ; les premières mesures exactes de la pé-

1. Nous sommes surpris qu'on n'ait pas poussé les observations de ce singulier astre, pendant la période d'invisibilité, avec les instruments les plus puissants. On sait seulement qu'elle est, alors, au-dessous de la douzième grandeur.

riode ont été effectuées par Bouillaud, puis par J. Cassini[1]. On connaît aujourd'hui la moyenne de cette période avec une grande précision, et on l'évalue à 331 jours 8 heures.

A la vérité, on a découvert aussi des irrégularités dans la période de Mira, mais ces irrégularités mêmes sont soumises à une périodicité qui rend le phénomène plus intéressant encore. Le plus grand éclat ne la range pas non plus toujours dans la même grandeur. Quelquefois elle ne dépasse guère la quatrième, tandis qu'à certaines époques, le 6 novembre 1799, par exemple, sa lumière a été presque aussi brillante que celle des étoiles de première grandeur : elle était, à cette époque, à peine inférieure à Aldébaran; parfois enfin, elle est restée invisible pendant un temps supérieur à plusieurs de ses périodes. Ainsi Hévélius ne put la voir d'octobre 1672 jusqu'au 23 décembre 1676, c'est-à-dire pendant plus de quatre années. La durée de sa visibilité à l'œil nu est également très-variable. Parfois elle s'élève jusqu'à quatre mois; parfois elle est de trois mois à peine. Enfin, pendant cet intervalle où, de la 6e grandeur elle passe à la 3e et dépasse même la seconde, pour décroître et revenir à la 6e, les phases d'augmentation et de diminution sont inégales. Elle croît plus rapidement de la 6e à la 4e grandeur que de celle-ci à la 3e, et met plus longtemps encore à atteindre la seconde. Tantôt sa période d'accroissement surpasse en durée celle de la diminu-

1. Bouillaud, s'appuyant sur les observations faites de 1638 à 1666, trouvait une période moyenne de 333 jours. Cassini, partant du premier maximum observé le 13 août 1596 jusqu'à celui de 1678, et évaluant à 89 le nombre des périodes écoulées, obtenait 334 jours; le même nombre résultait de toutes les observations faites jusqu'à 1703. Ces évaluations sont notablement trop fortes, en tant que moyennes, car les durées des périodes successives peuvent fort bien différer de 3 ou 4 jours. Mais on peut, en partant des nombres de Cassini, arriver à un nombre qui se rapproche beaucoup de la moyenne admise aujourd'hui. Il suffit de compter 90 périodes dans les 29 725 jours qui séparent les maxima de 1596 et de 1678; et aussi 118 périodes au lieu de 117 entre 1596 et 1703. Alors on a 330^j.27 et 331^j.18 pour les moyennes dans ces deux hypothèses. Or, la moyenne admise est 331^j.34.

tion, tantôt elle lui est inférieure. Mais toutes ces variations si curieuses paraissent soumises elles-mêmes à une certaine périodicité[1].

Mira n'est pas le seul exemple de changement périodique d'éclat dans les lumières stellaires; et la durée des variations n'est pas toujours aussi longue. *Algol*, dans la Tête de Méduse, ou β de Persée (fig. 289), est au moins aussi intéressante que Mira de la Baleine, mais sa période est beaucoup plus courte, et elle n'est jamais invisible, même à l'œil nu. Étoile de seconde ou de troisième grandeur pendant deux jours et treize heures et demie, elle décroît soudain, et, en trois heures et demie, descend jusqu'à la quatrième grandeur. Alors son éclat reprend une marche ascendante, et, au bout d'un nouvel intervalle de trois heures et demie, revient à son maxi-

1. On a cherché à exprimer ces variations par des formules où entrent des sinus. Argelander avait représenté toutes les observations des maxima de Mira de la Baleine par une formule de ce genre, permettant de calculer les époques des maxima à partir de celui du 9 septembre 1751. Mais ce savant a modifié en partie les termes additionnels, et voici celle qu'il a adoptée pour représenter les époques des maxima, à partir du maximum du 29.13 décembre 1865 :

$$29.13 \text{ déc. } 1865 + 331^{j}.3363\,E + 10^{j}.48 \sin\left[\frac{360^{0}}{11}E + 250^{0}1'\right] + 18^{j}.16 \sin\left[\frac{45^{0}}{11}E + 27^{0}9'\right] + 33^{j}.90 \sin\left[\frac{45^{0}}{22}E + 68^{0}3'\right] + 65^{j}.31 \sin\left[\frac{15^{0}}{11}E + 178^{0}26'\right].$$

Dans cette formule, E est le nombre entier des périodes écoulées à partir du maximum de 1865. Si nous en faisons l'application aux années 1877 et 1878, nous trouverons les dates suivantes pour les maxima :

Maximum de 1877, le 24 octobre à $4^{h}54^{m}11^{s}$ du soir.
— de 1878, le 9 octobre à $0^{h}46^{m}5^{s}$ du soir;

ce qui donne, pour la durée de la période comprise entre les deux maxima, 349.8277 jours, plus de 15 jours au-dessus de la moyenne générale. L'*Annuaire du Bureau des longitudes* fixe la première date au 10 novembre 1877. Laquelle de ces deux dates est la vraie? C'est une question que pourront seuls trancher les observateurs de ces phénomènes, pourvu qu'ils n'oublient pas que la formule d'Argelander est une formule empirique, dont cet astronome évaluait lui-même l'erreur probable à 7 jours (sur la durée de chaque période moyenne de $331^{j}.34$).

mum. Tous ces changements s'effectuent en moins de trois jours, ou plus exactement, en 2 jours, 20 heures, 49 minutes. Une circonstance remarquable est la décroissance continue de la durée de la période : en 1784, cette durée surpassait de $4^s.2$ celle de 1842, et celle-ci, à son tour, était supérieure de $1^s.8$ à la période observée en 1868. Il est possible, probable même selon Argelander, que les variations d'Algol, outre leur courte période d'environ 69 heures, soient soumises à une longue période.



Fig. 289. Algol, étoile variable de la constellation de Persée.

Deux autres étoiles changeantes, β de la Lyre et χ du Cygne, présentent également des périodes de périodes. La première de ces deux étoiles passe tous les 13 jours environ par deux maxima et deux minima : elle atteint le même éclat (3e et 5e grandeur) à chaque maximum, mais le minimum principal est au-dessous du second d'environ une demi-grandeur. L'étoile χ du Cygne, outre la période de 406^j, en aurait deux autres, l'une formée de 100, l'autre de 8 1/2 périodes secondaires.

Au nombre de ces étoiles variables à courtes périodes, δ de Céphée se distingue par la régularité de ses changements d'éclat qui durent 5 jours, 8 heures, 47 minutes, 40 secondes, et qu'on observe depuis 1784. δ de la Balance est l'étoile dont la période de variabilité a la plus courte durée, étant seulement de 2 jours, 7 heures, 51 minutes. Deux autres étoiles variables, l'une dans la Licorne, l'autre dans le Taureau, ont des périodes de 3 jours, 10 heures, 48 minutes, et de 3 jours, 22 heures, 52 minutes. Enfin, η de l'Aigle ainsi que deux étoiles du Sagittaire effectuent leurs variations en des périodes d'environ 7 jours.

Parmi les étoiles variables à longues périodes, on remarque Betelgeuse, l'une des quatre étoiles du grand quadrilatère d'Orion, dont la période est de près de 200 jours. Il en est une dans le Cygne dont les variations s'effectuent en 406 jours, et une autre dans l'Hydre qui revient au même éclat tous les 495 jours. Trois des sept étoiles du Chariot (Grande-Ourse) varient dans des périodes encore peu connues, mais qui embrassent certainement plusieurs années.

Quelle que soit la durée des périodes totales, il y a, parmi les étoiles changeantes, comme deux sortes de variabilité : dans les unes, l'accroissement et la diminution se font d'une manière continue, et pour ainsi dire insensible; d'autres se distinguent par des changements brusques et rapides. On peut voir, dans la figure 290, deux exemples de ces modes de variations. Une des courbes représente la plus grande partie de la période R Ophiucus, qui est de 304 jours; elle appartient à la classe des étoiles qui varient lentement. L'autre courbe, celle de U Gémeaux, dénote au contraire une étoile appartenant, comme Algol, à la classe des étoiles dont l'éclat subit des variations rapides.

Le nombre des étoiles simplement variables s'accroît tous les jours, à mesure que les cartes célestes, devenues plus parfaites, permettent de vérifier les moindres changements de position ou d'éclat que subissent des étoiles, depuis la 1re grandeur jusqu'à la 12e ou la 13e. Parmi celles dont la variabilité a été récemment constatée, il faut citer plusieurs étoiles du groupe des Pléiades. C'est aux recherches de M. Wolf, dont il a été question dans le paragraphe consacré aux groupes d'étoiles, qu'est due cette découverte. « Parmi les huit belles étoiles du groupe, Mérope et Atlas, dit-il, sont certainement variables ; Électre, Cœleno, Taygète et Pléione n'ont pas changé d'éclat; Maïa semble avoir augmenté depuis Piazzi et Bessel. » Six autres étoiles du groupe paraissent aussi avoir varié.

Sur un nombre total de 123 étoiles variables que l'on connaissait il y a peu d'années, 36 seulement n'ont pas de périodes connues, les 87 autres ont des périodes dont la durée est comprise entre 2 jours et 75 ans ; 31 sont visibles à l'œil nu au moment de leur maximum. Mais ce dernier nombre doit être modifié, si l'on regarde, avec le Dr Heis, comme visibles à l'œil

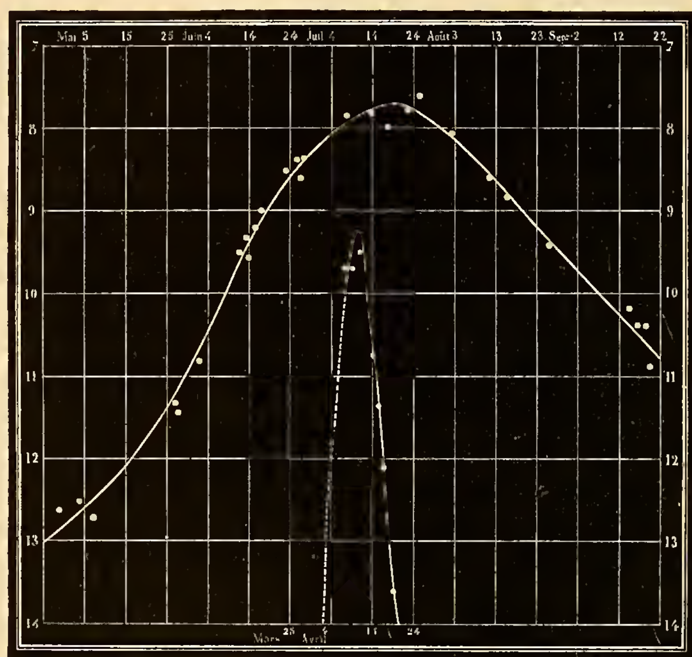


Fig. 290. Courbes des variations d'éclat des étoiles périodiques R Ophiucus et U Gémeaux, d'après M. Pogson.

nu toutes les étoiles au-dessus de la 6-7e grandeur. En effet, le catalogue de cet astronome donne un total de 43 étoiles variables visibles sur l'horizon de Münster, et 22 d'entre elles restent (pour le même observateur) visibles à l'œil nu au moment de leur minimum.

Voici, du reste, un tableau d'un certain nombre d'étoiles variables périodiques, choisies parmi celles dont la période est le mieux connue. Outre la durée de celle-ci, nous don-

nons l'époque d'un des derniers maxima observés, et la grandeur de l'étoile, à son maximum et à son minimum[1].

ÉTOILES	GRANDEUR max.	GRANDEUR min.	ÉPOQUES DU MAXIMUM	DURÉE DE LA PÉRIODE
δ Balance	4.9	6.0	30 juin 1868 (*min.*)	$2^j\ 7^h51^m19^s$
β Persée (Algol). .	2.3	4.0	1er juillet 1868 2^h43^m9	2 20 48 54
S Licorne	4.9	5.6	14 mars 1856 9^h36^m	3 10 48 »
λ Taureau.	3.4	4.3	7 juillet 1868 0^h13^m	3 22 52 24
δ Céphée.	3.7	4.9	4 juillet 1868 0^h30^m	5 8 47 40
X Sagittaire. . . .	4.0	6.0	6 juillet 1868 18^h29^m	7 0 25 34
η Aigle	3.5	4.7	3 juillet 1868 7^h11^m	7 4 14 4
W Sagittajre . . .	5.0	6.5	3 juillet 1868 21^h10^m	7 14 8 35
S Écrevisse	8.0	10.5	22 juin 1854 12^h0^m	9 11 36 58
ζ Gémeaux	3.7	4.5	9 juillet 1868 12^h30	10 3 47 36
β Lyre.	3.5	4.5	9 janvier 1868 4^h (*min.*)	12 21 51 »
R Écu de Sobieski.	4.7	9.0	16 août 1868 (*min.*)	71 17 » »
α Cassiopée	2.2	2.8	10 janvier 1844	79 3 » »
R Vierge	6.5	10.7	4 juin 1868	145 » » »
α Orion	1.0	1.4	26 novembre 1852	196 » » »
R Lion	5.3	10.0	9 août 1868	312 13 26 »
ο Baleine (Mira). .	2.0	< 12	29 décembre 1865 3^h7^m	331 8 4 16
S Serpent.	7.8	< 10	5 avril 1857	367 5 » »
χ_2 Cygne	4.0	13.0	15 mars 1868	406 2 52 5
R Hydre.	4.0	11.0	9 mars 1868	448 » » »

La plus longue des périodes que nous venons d'inscrire est d'environ 15 mois ; mais il en est de plus considérables, à la

1. On voit, par le tableau ci-dessus, que la plupart des périodes sont calculées avec une approximation qui va jusqu'aux secondes. Mais il faut bien comprendre qu'il s'agit là de moyennes obtenues par l'observation d'un grand nombre de révolutions. Nous avons cité plus haut des cas où les variations de chaque durée périodique sont des fractions notables de la moyenne. Nous devons dire aussi qu'il y a une incertitude relative à la période la plus courte, celle de δ de la Balance. M. Schmidt, l'un des astronomes qui, comme MM. Argelander, Schœnfeld, Winnecke, Heis, se sont le plus occupés des étoiles variables, assigne à cette étoile une période triple, de $6^j23^h33^m10^s$. Ce nombre étant, à quelques secondes près, précisément 3 fois celui donné plus haut, il semble probable qu'il s'agit là d'une période de périodes, analogue au double maximum et au double minimum de β de la Lyre.

vérité moins exactement déterminées[1]. Ainsi, on assigne 2 ou 3 ans à la période de l'étoile changeante β Petite-Ourse, 5 ou 6 ans à μ Céphée, plusieurs années aussi aux périodes de α et η Grande-Ourse, de κ Couronne australe, et l'étoile 24 Céphée n'aurait pas moins, selon M. Pogson, de 73 ans pour période. Nous allons voir, parmi les étoiles dont les variations semblent tout à fait irrégulières, qu'il en est une, η du Navire, qui serait également soumise à une longue périodicité, de 43 ans selon les uns, de 70 ans selon d'autres.

1. Nous terminerons ce paragraphe par une liste supplémentaire d'étoiles variables, en nous bornant à donner, pour chacune, la durée probable de la période.

Étoiles.	Périodes.	Étoiles.	Périodes.
β Pégase	31j.5	R Aigle	351j.5
ρ Persée	33 .0	R Serpent	356 .0
α Hydre	55 .0	R Petit-Chien	367 .0
α Hercule	88 .5	R Gémeaux	369 .7
U Gémeaux	96 .98	S Vierge	373 .6
T Poissons	143 .0	R Orion	378 .0
S Grande-Ourse	222 .65	R Écrevisse	380 .0
S Ophiucus	229 .37	R Verseau	388 .58
ε Cocher	250 .0	S Poissons	390 .0
T Grande-Ourse	256 .0	R Andromède	404 .0
S Hydre	256 .0	R Cygne	416 .72
T Capricorne	274 .0	S Orion	420 .0
T Gémeaux	288 .62	R Cassiopée	430 .0
S Gémeaux	294 .07	R Lièvre	439 .0
S Hercule	301 .5	U Capricorne	450 .0
R Grande-Ourse	302 .3	R Sagittaire	465 .0
R Ophiucus	304 .6	β Petite-Ourse	2 ou 3 ans.
R Couronne boréale	323 .0	μ Céphée	5 ou 6 ans.
R Hydre	326 .0	κ Couronne australe	qq. années.
R Taureau	330 .0	α Grande-Ourse	Id.
S Petit-Chien	335 .0	η Grande-Ourse	Id.
T Serpent	340 .5	η Navire	46 ou 70 ans.
R Poissons	343 .0	24 Céphée	73 ans.
R Pégase	350 .0		

§ 3. ÉTOILES NOUVELLES. — ÉTOILES TEMPORAIRES.

Des étoiles variables à périodicité constatée, nous passons aux étoiles nouvelles et temporaires, qui ne diffèrent peut-être des premières que par la durée plus considérable, et en tout cas inconnue, de leurs périodes. Nous en avons déjà cité plusieurs qui ont apparu subitement, à des époques reculées, en des points du ciel où la visibilité à l'œil nu ne laissait voir auparavant aucune étoile, et qui ensuite ont disparu. Peut-être, si les astronomes avaient eu alors à leur disposition des instruments puissants, auraient-ils pu constater que cette disparition n'était pas absolue, qu'elle correspondait seulement à un abaissement d'éclat au-dessous de la 6e grandeur. Nous verrons en effet plus loin un exemple récent d'une étoile qui, considérée d'abord comme nouvelle, était antérieurement marquée sur les cartes célestes parmi les étoiles télescopiques, et qui, après être devenue visible à l'œil nu, a repris le rang inférieur qu'elle occupait d'abord.

Passons en revue les apparitions les plus fameuses d'étoiles temporaires, dans les temps modernes.

« Un soir, raconte Tycho-Brahé, que je considérais, comme à l'ordinaire, la voûte céleste dont l'aspect m'est si familier, je vis avec un étonnement indicible, près du zénith, dans Cassiopée, une étoile radieuse d'une grandeur extraordinaire. Frappé de surprise, je ne savais si j'en devais croire mes yeux. Pour me convaincre qu'il n'y avait point d'illusion, et pour recueillir le témoignage d'autres personnes, je fis sortir les ouvriers occupés dans mon laboratoire, et je leur demandai, ainsi qu'à tous les passants, s'ils voyaient, comme moi, l'étoile qui venait d'apparaître tout à coup. J'appris plus tard qu'en Allemagne des voituriers et d'autres gens du peuple avaient prévenu les astronomes d'une grande apparition dans le ciel,

ce qui a fourni l'occasion de renouveler les railleries accoutumées contre les hommes de science. » (*Cosmos*, tome III, p. 167.)

C'est dans le courant de novembre 1572 qu'eut lieu cette étrange apparition.

L'étoile nouvelle observée par Tycho n'avait aucune des apparences d'une comète : aucune auréole nébuleuse, aucune queue ne l'accompagnait ; elle demeura d'ailleurs complétement immobile, au même point du ciel, pendant les dix-sept mois qu'elle fut visible. Elle était extraordinairement scintil-



Fig. 291. La Pèlerine, étoile nouvelle et temporaire, apparue en 1572 dans la constellation de Cassiopée.

lante, et tout d'abord son éclat surpassait celui de Wéga, de Sirius et de Jupiter même à sa plus petite distance de la Terre. « On ne pouvait le comparer, dit Tycho, qu'à celui de Vénus en quadrature. » Aussi resta-t-elle visible le jour, en plein midi, quand le ciel était pur. Mais peu à peu sa lumière diminua d'intensité. En janvier 1673, elle était déjà moins brillante que Jupiter ; dès le mois d'avril, elle passa de la première à la seconde grandeur, puis elle décrut rapidement et disparut enfin en mars 1574.

Non-seulement cette étoile extraordinaire fut variable d'éclat, mais sa couleur même subit des changements rapides :

blanche d'abord pendant les deux premiers mois, période de son plus grand éclat, elle passa ensuite au jaune, puis au rouge. Tycho la compare alors à Mars, à Betelgeuse, et surtout à Aldébaran. Enfin, dès le printemps de 1573, la couleur blanche reparut et persista jusqu'à la fin.

Plusieurs apparitions semblables avaient eu lieu à des époques plus reculées, dans divers points du ciel; deux d'entre elles notamment, que nous avons citées déjà, les étoiles nouvelles de 945 et de 1264, s'étaient fait voir entre Céphée et Cassiopée, presque dans la même région que la *Pèlerine*, surnom donné à l'étoile de 1572; de sorte qu'on crut quelque temps à l'identité des trois astres. Si cette identité pouvait être prouvée, il en faudrait conclure que les étoiles temporaires ne sont autre chose que des étoiles variables périodiques, et toute la différence viendrait de l'inégalité de la durée des périodes et de l'intensité des variations.

Depuis l'observation de Tycho-Brahé, plusieurs étoiles temporaires ont été vues dans les constellations du Serpentaire et du Cygne[1]; mais la plus brillante de toutes, celle de 1604, le fut moins que l'étoile de 1572 : elle était surtout remarquable par une scintillation très-vive qui lui donnait, selon l'expression de Képler, « toutes les couleurs de l'arc-en-ciel, ou d'un diamant taillé à facettes multiples, exposé aux rayons du Soleil. » Elle surpassait les étoiles de 1re grandeur, même Jupiter et Saturne, mais elle fût moins brillante que Vénus. Découverte en octobre 1604 par Jean Brunowski, élève de Képler (d'autres disent dès le 27 septembre par Herlicius), elle fut observée par le grand astronome jusqu'au moment où, en mars 1608, elle finit par disparaître comme la première, sans laisser de

1. La plupart des étoiles nouvelles ou temporaires se sont montrées à l'intérieur ou dans le voisinage de la Voie Lactée. Tycho en concluait que ces astres s'étaient formés aux dépens de la matière de cette grande nébulosité, opinion inadmissible, depuis qu'on sait que la Voie Lactée est tout entière composée d'étoiles distinctes ou d'amas d'étoiles.

traces. Selon Goldschmidt, cette étoile aurait été déjà vue quatre fois, en 393, 798, 1203, 1605, et serait ainsi une étoile variable ayant 405 ans en moyenne pour sa période, et devant faire sa prochaine réapparition en 2015.

Une étoile nouvelle apparut encore le 20 juin 1670, dans une partie de la constellation du Renard voisine de l'étoile β du Cygne. D'abord de 3e grandeur, elle s'abaissa à la 5e, puis disparut, et se montra de nouveau, mais comme une étoile de 4e grandeur, neuf mois après sa première apparition. Redevenue invisible en 1672, elle se montra une troisième fois le 29 mars de la même année, mais réduite alors à la 6e grandeur : depuis on ne l'a plus jamais revue.

Près de deux siècles s'écoulèrent sans qu'un phénomène pareil à ceux que nous venons de décrire fût remarqué ; en revanche, la variabilité d'un grand nombre d'étoiles et leurs périodes furent établies. En avril 1848, Hind constata l'apparition, dans Ophiucus, d'une étoile nouvelle de 5e grandeur, de couleur rouge-orange, et qui deux ans plus tard était non-seulement devenue invisible à l'œil nu, mais encore descendue à la 11e grandeur. Elle a conservé depuis, dit-on, son éclat final.



Fig. 292. Position et grandeur de l'étoile variable T de la Couronne boréale, le 12 mai 1866.

Il y a dix ans et demi, vers le milieu de mai 1866, divers observateurs, en Europe et en Amérique[1], furent frappés de l'apparition d'une nouvelle étoile dans la constellation de la Couronne, en un point où ne se voyait auparavant, à l'œil

1. M. Barker à London Canada West, M. Birmingham en Islande, M. l'ingénieur Courbebaisse à Rochefort.

nu, aucun point lumineux. Vers les 10 et 12 mai, l'éclat de cette étoile atteignait celui de la *Perle*, c'est-à-dire la 2ᵉ grandeur ; du 13 au 15, elle s'affaiblit jusqu'à la 3-4ᵉ grandeur; puis, après avoir passé par les grandeurs intermédiaires, elle devint invisible à l'œil nu vers le 20 du même mois. Au télescope, on la vit se réduire à la 10ᵉ grandeur, puis son éclat se ranimer de manière à atteindre, dans les premiers jours d'octobre, entre la 7ᵉ et la 8ᵉ grandeur. Nous donnons, d'après M. Baxendell, dans la figure 293, la courbe des grandeurs par lesquelles a passé l'étoile T de la Couronne,

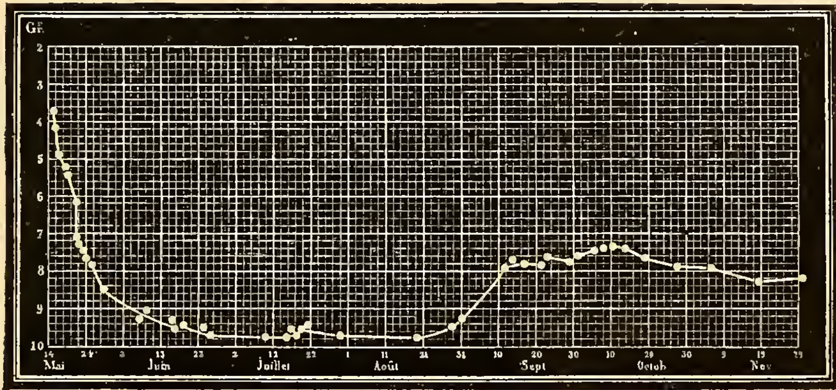


Fig. 293. Courbe des variations d'éclat de T de la Couronne, d'après M. Baxendell.

depuis le 14 mai jusqu'au 29 novembre. A cette dernière date, elle était un peu au-dessous de la 8ᵉ grandeur; il eût été intéressant de savoir si elle a varié depuis, ou si elle s'est maintenue au même éclat.

En recherchant sur les catalogues et sur les cartes, plusieurs astronomes reconnurent que l'étoile prétendue nouvelle occupait la position précise d'une étoile de 9ᵉ grandeur; d'où l'on doit conclure qu'il s'agit en effet d'une étoile variable, et que nous avons été seulement témoins de l'une des phases de son maximum. Peut-être est-ce une variable irrégulière, comme sont sans doute aussi les étoiles nouvelles antérieure-

ment signalées ; peut-être est-ce une variable périodique, dont la période a une durée considérable : on verra plus loin les raisons qui font pencher plutôt pour la première hypothèse.

Enfin, le 24 novembre de cette année 1876, et depuis que ce chapitre est en cours d'impression, une étoile nouvelle a fait son apparition dans le Cygne, et se trouve en ce moment l'objet de l'étude des astronomes. Nous aurons l'occasion d'en parler dans le chapitre suivant.

Terminons cette étude des étoiles nouvelles, variables périodiques ou variables irrégulières, par la description du plus étonnant de tous les phénomènes de ce genre : je veux parler des variations de l'étoile η du Navire (ou d'Argo), variations qui occupent les astronomes depuis plus d'un siècle, et qui sont telles, qu'on ne sait encore positivement s'il faut classer cette étoile singulière parmi les étoiles temporaires, ou parmi les étoiles périodiques.

Vers la fin du dix-septième siècle, η d'Argo n'était qu'une étoile de quatrième grandeur ; mais moins d'un siècle après, en 1751, elle atteignait la seconde. Soixante ans plus tard, elle était redescendue à sa première intensité, pour croître de nouveau jusqu'à l'année 1826. Depuis cette époque, elle a passé par les phases les plus étonnantes, oscillant entre la première et la seconde grandeur, tantôt égale à α de la Croix, puis à α du Centaure, dépassant Canopus et approchant enfin de Sirius. La rapidité de ces changements, leurs périodes inégales, la longue durée de cet état de variabilité, l'impossibilité d'y trouver une loi plus ou moins régulière, ont contribué à faire de cette belle étoile un des plus curieux objets du ciel. Un astronome contemporain,



Fig. 294. Étoile changeante η du Navire (ou d'Argo), à son maximum d'éclat.

M. F. Abbott, qui a suivi les variations d'η du Navire jusqu'à ces derniers temps, nous apprend qu'après avoir, en 1843, atteint l'éclat de Sirius, elle a diminué progressivement en passant par tous les ordres de grandeur, intermédiaires entre la première et la sixième : entre 1863 et 1867, elle n'a pas dépassé cette dernière grandeur, et, selon M. Tebbutt, elle était alors visible à l'œil nu. Nous avons dit plus haut qu'on soupçonnait une certaine périodicité dans les variations de cette période singulière. La figure 295 représente, d'après M. Loomis, la courbe probable de ces changements, dont la période serait de 70 années environ. La forme de la courbe,

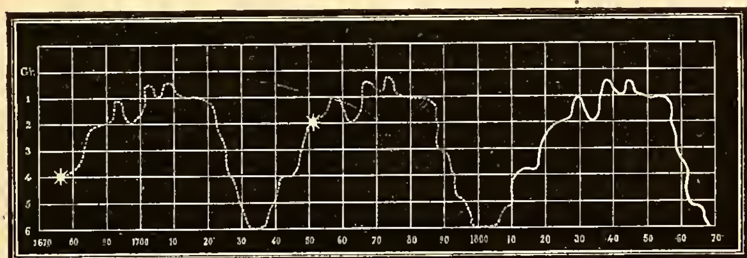


Fig. 295. Courbe représentant les variations d'éclat de l'étoile η du Navire, dans une période de 70 ans, d'après M. Loomis.

entre 1811 et 1870, est donnée directement par les observations, et les deux observations d'Halley en 1677, de Lacaille en 1751, se trouveraient représentées par la même courbe antérieurement répétée. Les observations futures montreront ce qu'il y a de fondé dans cette hypothèse.

Nous n'avons mentionné jusqu'ici, parmi les étoiles temporaires, que des étoiles nouvellement apparues, et qui, après s'être montrées un certain temps, sont ensuite devenues invisibles. Mais il faut citer aussi quelques exemples d'étoiles connues des astronomes, et qui, à partir d'une certaine époque, ont disparu du ciel, ou du moins ont diminué d'éclat au point de devenir invisibles. Cassini cite, parmi ces dernières, l'étoile

de la Petite-Ourse, marquée ε dans le catalogue de Bayer, et qui avait disparu. Maraldi a constaté pareillement la disparition de plusieurs étoiles, inscrites jusque-là aux catalogues, dans les constellations du Lion, du Scorpion, de la Vierge. A la vérité, les catalogues dont il s'agit ayant été construits récemment à l'époque où observaient ces astronomes, il est possible que les étoiles disparues aient été simplement des étoiles variables, dans leurs périodes de minimum d'éclat.

§ 4. HYPOTHÈSES DIVERSES SUR LES CAUSES DE VARIABILITÉ DES ÉTOILES.

Pour expliquer les variations d'éclat de l'étoile périodique Omicron de la Baleine, Bouillaud supposait (1667) que « cette étoile est un globe, dont la plus grande partie de la surface est obscure, et l'autre partie est lumineuse ; que ce globe a un mouvement propre autour de son axe, et présente à la Terre, tantôt sa partie claire, et tantôt sa partie obscure, ce qui cause la vicissitude de ses apparences[1]. » Cette hypothèse devait paraître alors d'autant plus vraisemblable, qu'on avait découvert, une cinquantaine d'années auparavant, le mouvement

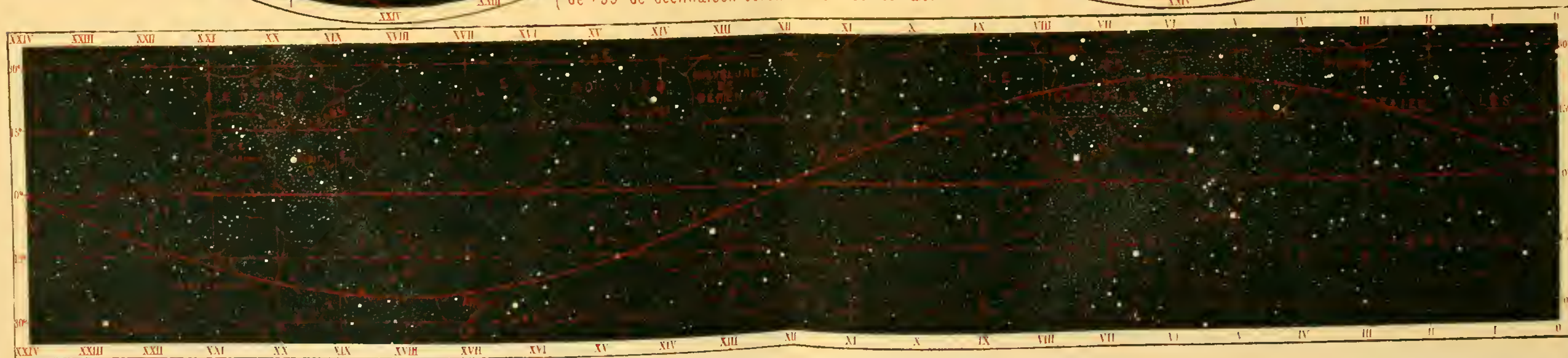
1. En rapportant cette explication, Cassini II fait observer que le P. Riccioli l'avait donnée avant Bouillaud. La manière dont le savant jésuite formulait son opinion est originale; elle caractérise trop bien la tournure d'esprit de quelques savants de son époque (on en trouverait de pareils chez nos contemporains), pour que le lecteur ne nous sache pas gré de la reproduire : « Son sentiment est que les étoiles nouvelles ont été créées dans le ciel dès le commencement du monde, mais que, parmi elles, il s'en trouve quelques-unes qui ne sont pas lumineuses dans toute leur étendue; qu'il y a, par exemple, une moitié de leur globe lumineuse, et une moitié obscure, et que, lorsqu'il plaît à Dieu de faire paroître aux hommes quelque signe extraordinaire, il leur expose la partie éclairée qui étoit opposée à la terre, en la faisant tourner subitement par le moyen de quelque intelligence, ou par quelque faculté attribuée à cette étoile; après quoi, par une semblable révolution, elle se dérobe tout d'un coup aux yeux, ou elle diminue peu à peu, de même que la lune dans son décours. »

CONSTELLATIONS
des deux Hémisphères.
Etoiles des 6 premiers ordres de grandeur





CONSTELLATIONS
de la Zône Équatoriale
(de +35° de déclinaison boréale à -35° de déclinaison australe



E. Guillemin del et sc.

de rotation du Soleil, et qu'il était naturel d'admettre par analogie un pareil mouvement dans les étoiles. Quant au fait de faces plus ou moins lumineuses, il pouvait se justifier de la même manière, en considérant les faces obscures comme produites par un envahissement de taches semblables aux taches noires du Soleil. Cependant Cassini, qui objectait à Bouillaud les inégalités d'éclat de Mira à ses diverses périodes, ne songeait pas à expliquer ces inégalités par les changements survenus dans le nombre et la position des taches : il supposait un mouvement particulier dans les pôles de révolution de l'étoile.

Aujourd'hui, l'hypothèse de la rotation est assez généralement admise, au moins pour les étoiles dont la période est régulière ; mais ce n'est pas la seule hypothèse possible, et d'ailleurs elle n'indique rien de certain sur la nature intime des phénomènes qui donnent lieu aux changements d'éclat. Les faces du globe stellaire peuvent être considérées comme inégalement lumineuses, ces inégalités restant constantes pendant de longs intervalles de temps : c'est ce que supposait Bouillaud. Ou bien, les accidents qui, à des époques inconnues, ont atteint partiellement la photosphère sont, comme les taches du Soleil, des accidents variables, et, dans ce cas, les périodes doivent être affectées d'irrégularités, de changements plus ou moins lents. Quelques astronomes considèrent les étoiles variables, comme des soleils dont le refroidissement a successivement consolidé certaines parties de leur surface, en un mot comme des soleils *encroûtés*. On peut encore admettre que les variations d'éclat proviennent de la forme très-aplatie du globe stellaire. C'était l'hypothèse de Maupertuis : mais, dans ce cas, ce n'est plus la rotation qui cause directement les changements que nous constatons périodiquement dans leur lumière. Maupertuis admettait que certaines étoiles, tournant avec une grande rapidité sur leur axe, ont un aplatissement considérable, que des planètes circulant autour de

ces astres dans des orbites très-excentriques pouvaient, en passant au périhélie, agir par leur masse sur l'étoile située au foyer, incliner plus ou moins son axe de rotation et faire ainsi qu'elles tournent vers nous des faces différentes. Tantôt ces étoiles se présenteraient à nous par un de leurs méridiens ou par leur tranchant; en ce cas, elles seraient à leur minimum d'éclat; tantôt elles se montreraient comme des sphères ayant même diamètre que leur équateur, et alors ce serait l'époque de leur maximum. Cette opinion, toute conjecturale, soulève à la vérité des objections de plus d'un genre.

On a encore imaginé d'autres causes de la variabilité périodique des étoiles : par exemple, l'occultation ou l'éclipse totale ou partielle que des satellites obscurs, des planètes produisent en passant au-devant de l'étoile, sur la ligne qui joint son centre à la Terre. En ce cas, la période de disparition et celles de diminution ou d'augmentation qui précèdent ou qui suivent la première, devraient être très-courtes comparativement à la période pendant laquelle l'étoile conserve un éclat lumineux constant : c'est précisément le cas pour Algol, dont la phase de diminution a une faible durée relativement à la durée totale de sa période. Il est vrai qu'alors, il faudrait supposer que le satellite occultant accomplit sa révolution totale dans le court intervalle de 2 jours 21 heures, ce qui peut sembler improbable. Au lieu de corps obscurs tels que des planètes, on a supposé des nébulosités dont l'interposition périodique pourrait produire les même effets : comme ces nébulosités peuvent former de longues traînées, analogues par exemple aux traînées météoriques de notre monde solaire, elles rendraient compte d'une manière plus satisfaisante des phénomènes observés que les satellites obscurs. Du reste, disons que cette dernière explication de la variabilité des étoiles a été suggérée par un fait d'observatien : quelques-uns de ces astres ont paru, pendant la période du minimum d'éclat, entourés d'une sorte de brouillard.

En résumé, il est difficile de décider laquelle de ces hypothèses diverses est la plus vraisemblable : peut-être toutes sont-elles vraies à divers degrés; mais celle qui explique les périodes très-régulières par la rotation nous paraît la plus probable, et, dans ce cas, le tableau que nous avons donné plus haut (p. 769) nous indiquerait en même temps les durées des rotations d'un certain nombre de soleils, les uns tournant sur leurs axes, comme Algol, avec une vitesse neuf fois plus grande que celle de notre Soleil, les autres, tels que l'étoile R de l'Hydre, ayant un mouvement de rotation dix-sept fois plus lent. C'était l'opinion de W. Struve. Parmi les étoiles variables, on remarque des couples binaires. Telle est γ de la Vierge, dont nous avons eu l'occasion de citer le mouvement de révolution. Les deux étoiles qui la composent ont changé d'éclat, et la plus brillante est devenue inférieure à l'autre, au bout de quelques années. La variable α de Cassiopée est aussi une étoile double : Struve fait observer qu'il y en a beaucoup d'autres. « Ce qui est surtout d'une haute importance, ajoute alors cet éminent astronome, c'est qu'on peut conclure de ce changement de lumière des étoiles doubles, qu'elles se meuvent autour d'un axe de rotation, et que par conséquent nous avons trouvé une nouvelle analogie entre ce système de plusieurs soleils et notre système planétaire. » Dans l'hypothèse des satellites obscurs, on peut voir que si l'analogie est autre, elle n'est pas moins curieuse.

Les mêmes explications peuvent-elles rendre compte des phénomènes présentés par les étoiles variables non périodiques, par les étoiles nouvelles ou temporaires, par les étoiles qui ont disparu de la voûte des cieux? La régularité du mouvement de rotation ne permet point évidemment de s'arrêter à cette seule hypothèse : il y faut joindre des changements accidentels survenus dans l'astre lui-même. Nous en verrons plus loin des exemples; mais l'interposition d'astres obscurs, de nébulosités opaques étrangères au système de l'étoile va-

riable, pourrait encore jusqu'à un certain point rendre compte d'un affaiblissement temporaire.

Quant aux étoiles nouvelles qui, comme la Pèlerine de 1572, l'étoile de Képler, etc., ont fait une subite apparition en atteignant presque aussitôt un éclat prodigieux, si ce sont des étoiles variables dont la période d'éclat minimum ou d'extinction complète est très-longue, comment expliquer ces brusques changements d'intensité, ces apparitions presque subites d'astres, qui, du premier coup, atteignent leur plus grand éclat? On a cherché jadis à s'en rendre compte, en supposant un mouvement très-rapide de l'étoile, mouvement qui, en peu de temps, la rapproche ou l'éloigne considérablement de la Terre; mais de toutes les hypothèses, c'est évidemment la plus invraisemblable. Arago examinant [1] cette question du mouvement, démontre que pour passer de la première à la seconde grandeur par un simple changement de distance, il faudrait six ans à une étoile qui se déplacerait avec la vitesse de la lumière, ou parcourant 300000 kilomètres par seconde. Or, l'étoile de 1572 a subi en un mois une pareille variation. Il faudrait donc supposer une vitesse 72 fois plus grande, c'est-à-dire deux cent mille fois supérieure à la vitesse du plus rapide des mouvements d'étoiles connu, hypothèse évidemment absurde.

D'un autre côté, si l'on explique ces phénomènes par d'immenses incendies, des conflagrations subites survenues à la surface d'astres jusqu'alors obscurs, par des extinctions progressives amenant la décroissance d'éclat, puis la disparition, de telles catastrophes sont bien faites pour frapper notre imagination et détruire cette idée si ancienne de l'immuabilité des cieux. Peut-être les forces électriques et magnétiques jouent-elles un rôle dans la production de ces gigantesques coups de théâtre. Humboldt semble pencher vers cette idée. Il proteste

1. *Annuaire du Bureau des longitudes pour* 1842, p. 327.

contre l'hypothèse d'une destruction, d'une combustion réelle des étoiles devenues invisibles. « Ce que nous ne voyons plus, dit-il, n'a pas nécessairement disparu.... L'éternel jeu des créations et des destructions apparentes ne conclut point à un anéantissement de la matière ; c'est une pure transition vers de nouvelles formes, déterminée par l'action de forces nouvelles. Des astres devenus obscurs peuvent redevenir subitement lumineux par le jeu renouvelé des mêmes actions qui y avaient primitivement développé la lumière. »

Il est peut-être plus difficile encore d'imaginer que les variations des étoiles temporaires soient dues à des mouvements de rotation. Il faudrait en effet supposer des faces d'un éclat prodigieusement inégal, et, même dans ce cas, on ne comprendrait guère une apparition subite et atteignant d'un seul coup l'intensité maximum. Les changements de couleur seraient pareillement inexplicables.

En résumé, la variabilité des étoiles paraît se ramener à deux phénomènes en apparence distincts. L'un est caractérisé par une périodicité régulière, d'une régularité pour ainsi dire mathématique, dont la cause, tout le fait présumer, est mécanique, c'est-à-dire réside dans un mouvement constant, uniforme, qui ne peut être que la rotation de l'étoile. L'autre phénomène consiste dans une variabilité irrégulière, intermittente, dont les phases présentent bien aussi, en certains cas, des retours périodiques, mais affectés le plus souvent d'oscillations considérables. Il n'est donc pas permis de lui attribuer une cause aussi régulière que la rotation uniforme de l'étoile. Cette cause est probablement plutôt physique que mécanique; elle consiste peut-être en modifications dans l'état physico-chimique de la photosphère de l'étoile. Nous savons que notre Soleil est affecté de semblables variations à plus ou moins longues périodes : sa photosphère et sa chromosphère passent par des alternatives d'activité et de repos qui se manifestent à nos yeux par l'abondance ou par l'absence de taches, de

facules, d'éruptions hydrogénées. De tels changements ont lieu sans doute, au sein des étoiles à variabilité brusque, irrégulière, sur une échelle assez grande pour que leurs radiations lumineuses soient tantôt exaltées, tantôt déprimées[1].

1. M. Faye a publié, en 1866, sur les étoiles nouvelles et sur les étoiles variables, d'intéressantes considérations sur les causes de ces deux ordres de phénomènes, qu'il n'y a pas lieu, suivant lui, de distinguer l'un de l'autre. Le savant astronome, après avoir passé en revue leurs analogies et leurs différences, croit qu'on peut passer des étoiles nouvelles aux étoiles variables par des gradations insensibles. Il examine si les unes et les autres « ne seraient pas autre chose que les états successifs d'un même phénomène dont le ciel nous offrirait à la fois toutes les phases : les étoiles à éclat constant, les étoiles à faibles variations périodiques; les étoiles à périodes irrégulières; celles qui s'éteignent presque dans leurs minima ; celles qui cessent de varier pendant un temps plus ou moins long, mais qui reprennent de l'éclat et subissent alors des variations considérables pour s'affaiblir de nouveau pendant un long laps de temps; enfin les étoiles presque éteintes qui se rallument convulsivement, présentent des intermittences plus ou moins prolongées, reviennent bientôt à leur faiblesse première ou disparaissent tout à fait. » Considérant le Soleil comme une étoile périodique, M. Faye cherche à rendre compte des intermittences de sa radiation, par le jeu des forces intérieures qui donnent lieu aux courants ascendants et descendants au sein de la masse incandescente. Quand cet échange régulier de la masse gazeuse interne et de sa photosphère brillante se fait librement, la radiation reste à peu près constante ; si, par les progrès du refroidissement, cet échange a lieu par intermittences, la radiation subit des diminutions et des recrudescences périodiques. De telles oscillations régulières se manifestent, dans le Soleil, par les périodes de onze, de cinquante-cinq et de cent soixante-cinq années. Ce sont de telles intermittences, plus ou moins prononcées et plus ou moins durables, qui caractérisent le phénomène des étoiles variables périodiques : à mesure que de telles perturbations deviennent plus irrégulières, plus saccadées, séparées de plus en plus par de très-longs intervalles de temps, ils sont les précurseurs de l'extinction définitive de l'étoile. Ce sont ces phénomènes que présentent, d'après M. Faye, les étoiles nouvelles et temporaires. Notre savant compatriote rejette donc les deux hypothèses de la rotation et de l'occultation des étoiles par des satellites obscurs, pour ne conserver que celle qui rend compte de la variabilité par des changements physiques dans les photosphères stellaires. Cet exclusivisme ne nous semble pas fondé, et nous croyons qu'il est difficile d'admettre, dans les photosphères des étoiles à période très-courte et très-régulière, des changements aussi rapides et aussi considérables que ceux constatés dans la lumière de ces étoiles par des observations qui embrassent déjà de longues années et de nombreuses périodes.

Enfin, si l'on conçoit que les deux phénomènes se combinent dans un certain nombre d'étoiles, on s'expliquera les apparences complexes de leur variabilité, qui participe à la fois de celle des étoiles changeantes à période constante et de celle des étoiles temporaires ou à période discontinue.

Même en admettant cette double hypothèse, il restera toujours à savoir en quoi consistent les différences d'aspect des faces que l'étoile nous présente en tournant autour de son axe. On peut supposer, comme on l'a déjà dit, que les unes sont entièrement lumineuses, tandis que les autres sont recouvertes, en proportion plus ou moins grande, de taches obscures. Mais alors, ces taches ne sont pas temporaires ni mobiles, comme celles du Soleil, sans quoi la périodicité n'aurait pas la régularité constatée par de longues observations.

La vérité est que ce sont des faits, des faits authentiques; et que l'imagination se serait longtemps perdue à en chercher les causes, si l'application de la méthode d'analyse spectrale à l'étude des lumières stellaires n'était venue apporter son contingent de faits d'observation à la solution du problème, et jeter un jour tout nouveau sur l'étude si difficile de la constitution physique et chimique des étoiles. Ce sont ces observations que nous allons décrire dans le chapitre suivant.

VI

LES LUMIÈRES STELLAIRES

§ 1. COULEURS DES ÉTOILES.

A l'œil nu, et au premier aspect, la plupart des étoiles sont blanches. Quand la scintillation est un peu prononcée, on les voit bien passer rapidement par une multitude de couleurs variées; mais c'est là, on le sait, un phénomène dont la cause est purement atmosphérique. Il en est de même de la coloration rougeâtre que prennent les étoiles, quand elles sont voisines de l'horizon; l'interposition de couches vaporeuses plus ou moins épaisses explique cette coloration accidentelle, étrangère aux astres eux-mêmes.

Mais une étude plus attentive, faite dans des conditions où ces perturbations passagères peuvent être évitées, montre bientôt que si, parmi les étoiles visibles à l'œil nu, il en est beaucoup qui ont une lumière blanche, comme Wéga, par exemple, d'autres ònt une coloration rouge prononcée, comme Arcturus, Aldébaran.

Les astronomes grecs, selon Arago, ne connaissaient que des étoiles rouges et des étoiles blanches : les étoiles de couleur bleue, verte, jaune n'ont été remarquées que dans les temps modernes. Aujourd'hui que cette branche de l'observation est cultivée avec soin, on a reconnu dans la lumière des

soleils toutes les nuances de l'arc-en-ciel[1]. Parmi les étoiles blanches, outre Wéga, que nous venons de nommer, citons Sirius, Régulus, Deneb, l'Épi, Algol, β de la Lyre, ε du Cocher.

Les étoiles rouges les plus remarquables sont Arcturus, Aldébaran, Antarès, α d'Orion, Pollux. Ptolémée, dans l'*Almageste*, nomme toutes ces étoiles υποκιρροι, rouges-jaunâtres. Joignons-y α et γ de la Croix, et les étoiles variables η du Navire, Mira. Dans ses *Observations du Cap*, J. Herschel donne un catalogue de 76 étoiles isolées, de 6e à 10e grandeur, dont la couleur rouge est très-prononcée, puisqu'il la caractérise par ces termes : rouge de rubis, rouge de sang, écarlate, rouge-pourpre, etc. D'après M. Hind, la couleur d'un grand nombre d'étoiles variables est rouge ; mais ce n'est pas là toutefois un caractère essentiel, et si Mira et η du Navire sont de couleur rougeâtre, la lumière d'Algol est blanche. Procyon, la Chèvre, la Polaire, Ataïr sont jaunes. La lumière de Castor est d'un vert pâle, et celle de l'étoile η de la Lyre offre une couleur bleue prononcée. Toutefois il faut dire que la couleur blanche légèrement azurée, ainsi que l'a fait remarquer le P. Secchi, est celle de la très-grande majorité des étoiles.

C'est dans les couples et dans les groupes de soleils que

1. C'est une détermination délicate, que l'emploi des lunettes rend plus sûre, en dépouillant le point lumineux observé des faux rayons qui l'entourent, mais qui est sujette à des erreurs provenant des circonstances dans lesquelles se fait l'observation. Les divers observateurs ne sont donc pas toujours d'accord sur la nuance d'une même étoile (on l'a déjà vu à propos des satellites de Jupiter), ce qui tient à la fois à des influences d'appréciation individuelle, peut-être aussi à l'état de l'atmosphère, et dans certains cas à la nature des instruments : le métal des miroirs des télescopes réfléchit d'ordinaire une lumière rougeâtre qui altère la coloration propre des astres observés. D'après Struve, la couleur des étoiles est ordinairement prononcée jusqu'à la neuvième grandeur. Cependant nous trouvons dans les catalogues de sir J. Herschel un certain nombre d'étoiles encore plus petites, dont la couleur est donnée ; et l'amiral Smyth affirme qu'il a été frappé de la belle teinte bleue (*the beautiful blue teint*) de quelques-unes des plus petites étoiles visibles dans son télescope.

la coloration de la lumière se présente avec tout son éclat et toute sa richesse. La plus grande variété distingue les couleurs des composantes de ces systèmes, déjà si remarquables à tant d'autres points de vue. Laissons parler à ce sujet le laborieux astronome de Dorpat et de Poulkova, M. W. Struve.

« L'attentive observation des étoiles doubles brillantes nous apprend, dit-il, qu'outre celles qui sont blanches, on en rencontre de toutes les couleurs du prisme ; mais que, lorsque l'étoile principale n'est pas blanche, elle s'approche du côté rouge du spectre, tandis que le satellite offre la teinte bleuâtre du côté opposé. Cependant, cette loi n'est pas sans exception ; au contraire, le cas le plus général est que les deux étoiles ont la même couleur. Je trouve, en effet, parmi 596 étoiles doubles brillantes :

375 couples dont les composantes ont la même couleur et la même intensité ;
101 couples où la même couleur est à une intensité différente ;
120 couples de couleur totalement différentes.

« Parmi les étoiles de même couleur, les plus nombreuses sont les blanches, et, des 476 étoiles de cette espèce, j'ai trouvé :

295 couples où les deux composantes sont blanches ;
118 couples où elles sont jaunes ou rougeâtres ;
63 couples où elles sont bleuâtres. » (*Mesures micrométriques obtenues à l'Observatoire de Dorpat*, p. 33 et 34.)

Nous avons relevé, dans les sept premiers catalogues d'étoiles doubles de sir J. Herschel, tous les couples dont cet astronome a mentionné les couleurs, en considérant comme blanche celle des deux composantes dont la teinte est accidentellement omise. Le nombre de ces couples est de 290 et les couleurs, soit de l'étoile principale, soit de l'étoile satellite, sont résumées dans le tableau suivant [1] :

1. Ce tableau est à double entrée, comme la table de Pythagore, ce qui permet d'en trouver aisément la signification. Ainsi le nombre 80, qui est à la rencontre de la troisième ligne horizontale et de la quatrième ligne verti-



ÉTOILES COLORÉES

1. Amas de κ de la Croix. — 2. κ de Pégase. — 3. 61ᵉ du Cygne. — 4. δ du Serpent. — 5. γ d'Andromède. — 6. η de Cassiopée. — 7. Étoile double du Navire. — 8. 32 de l'Éridan. — 9. σ de Cassiopée. — 10. β du Cygne. — 11. γ du Lion. — 12. α d'Hercule. — 13. η de Persée.

COULEURS DES ÉTOILES PRINCIPALES.	COULEURS DES SATELLITES. Rouge.	Orangé.	Jaune.	Bleu.	Blanc.	TOTAL.
Rouge.	24	0	0	27	50	 101
Orangé.	1	0	2	20	6	 29
Jaune.	2	0	17	80	9	 108
Bleu.	0	0	0	0	1	 1
Blanc.	30	0	3	17	1	 51
TOTAL.....	57	0	22	144	67	 290

Ce relevé est fait sur un nombre total de 5500 étoiles doubles environ ; mais, comme l'observateur n'a mentionné que les étoiles colorées, il ne faut pas s'étonner de l'apparente contradiction avec les résultats de Struve, en ce qui regarde la proportion des couples où les composantes sont de même couleur, et particulièrement toutes deux blanches. Sur 42 couples où les composantes ont même couleur, ce sont les rouges qui l'emportent, puis viennent les jaunes. Il n'y en a pas où les deux étoiles soient orangées, ni où elles soient bleues. Les plus nombreux couples, 80, sont ceux où le jaune de la principale est associé au bleu du satellite ; Herschel signale plusieurs cas où le bleu est manifestement un effet de contraste. Les couples *rouge-blanc*, *blanc-rouge*, *rouge-bleu*, *orangé-bleu*, *blanc-bleu*, sont ensuite ceux qui prédominent.

En résumé, les couleurs des principales sont surtout le

cale, indique que le nombre des couples, où la principale est jaune et le satellite bleu, est de 80. Nous avons réduit les teintes à cinq. Ainsi la couleur bleue comprend à la fois les étoiles *bleues*, *bleu-verdâtres*, *vert-bleuâtres* ; l'orangé renferme les *orangé-rouges* et *orangé-jaunes*. Cette simplification nous a semblé d'autant plus naturelle, que c'est sur ces distinctions de nuances que diffèrent généralement les divers observateurs.

jaune ; le rouge, le blanc viennent ensuite. Les couleurs des satellites sont, en premier lieu, le bleu, puis le blanc et le rouge. Un seul couple a sa principale bleue ; il n'y en a aucun où le satellite ait la teinte orangée proprement dite ; mais cette couleur est si voisine, soit du rouge, soit du jaune, que cette absence a peu de signification[1].

On crut d'abord que la couleur bleue était un simple effet de contraste ; qu'elle était due à la faiblesse de la lumière de l'étoile la plus petite comparée à la lumière jaune, plus éclatante, de l'étoile principale. Mais si cette illusion d'optique peut se présenter quelquefois, l'observation démontre qu'elle n'est qu'accidentelle et qu'il existe des étoiles bleues. En effet, Struve a rencontré tout aussi souvent un satellite bleu avec une principale blanche, qu'avec une principale d'un jaune foncé. D'ailleurs, on cite des couples dont les deux composantes sont bleues. Telles sont les étoiles doubles, δ du Serpent et la 59e d'Andromède. Enfin, il y a, suivant Dunlop, dans le ciel austral, un groupe composé d'une multitude d'étoiles qui sont toutes bleues.

1. Voici la liste de quelques-unes des étoiles les plus connues, avec indication de leurs couleurs, d'après Dembowski, sir J. Herschel et Struve :

	PRINCIPALES.		SATELLITES.	
	Grandr.	Couleur.	Grandr.	Couleur.
η Cassiopée	3.3	jaune clair	7.2	pourpre.
α Poissons	4.2	bleu-verd. clair.	5.6	olive-cendré.
β Orion	1.0	blanche	7.6	bleu de ciel.
α Gémeaux	3.0	jaune-verdâtre	4.1	jaune-vert foncé.
ε Hydre	3.7	jaune clair	7.3	olive-cendré.
γ Lion	2.2	jaune d'or	3.7	jaune d'or foncé.
70 Ophiucus	4.2	jaune clair	6.0	pourpre clair.
δ Cygne	3.0	blanche	7.4	bleu clair.
61e Cygne	5.1	jaune d'or	6.0	jaune d'or foncé.
β Céphée	4.0	bleue	6.0	bleue.
α Centaure	1.0	jaune	2.0	jaune.
26 Baleine	6.7	jaune-blanc	10.5	pourpre.
ζ Hercule	3.0	jaune	6.5	rougeâtre.
π Gémeaux	5.0	jaune	10.0	bleue.
η Couronne	5.0	jaune	6.0	jaune.

Toutes les nuances possibles, je l'ai déjà dit, se rencontrent dans les étoiles doubles colorées. Le blanc s'y trouve associé avec le rouge clair ou sombre, pourpre, rubis, vermeil. Là, c'est une étoile verte avec une étoile rouge de sang foncé, un soleil principal orangé accompagné d'un soleil pourpre, bleu-indigo. L'étoile triple γ d'Andromède est formée d'un soleil rouge orangé, accompagné de deux autres soleils dont la lumière est couleur vert d'émeraude, selon certains observateurs, dont l'un est jaune pâle et l'autre bleu, selon d'autres. Nous avons aussi noté, dans les catalogues d'Herschel, plusieurs étoiles triples colorées. Dans l'une de ces associations stellaires, la principale est rouge et les deux composantes sont bleues ; dans une autre, la première est blanche avec deux satellites rouges, ou blanche avec deux satellites, l'un rouge, l'autre blanc.

Deux étoiles que nous avons citées déjà pour leurs distances et pour la durée de leurs révolutions, la 61e du Cygne et α du Centaure, ont chacune pour composantes deux soleils jaune orangé.

La planche XXXIV donnera une idée de ces associations de couleurs. J'y ai joint, d'après John Herschel, un groupe extrêmement remarquable, situé dans la Croix du Sud, près de l'étoile κ. Il se compose de cent dix étoiles, dont sept seulement dépassent la dixième grandeur. Parmi les principales, deux sont rouges et rouge vermeil, une est d'un bleu verdâtre, deux sont vertes et trois autres sont d'un vert pâle. C'est un objet très-brillant et d'une grande beauté. « Les étoiles qui le composent, vues dans un télescope d'une ouverture assez grande pour distinguer les couleurs, font l'effet, dit Herschel, d'un écrin de pierres précieuses polychromes[1]. »

1. *Astronomical observations at the cape of good Hope*, p. 17. On trouve dans le XXXIIIe volume des *Monthly notices*, un dessin du groupe de κ Croix, de M. W. C. Russell, où les couleurs des étoiles sont quelque peu différentes de celles qu'a indiquées J. Herschel.

J'ai dit plus haut qu'il fallait distinguer la couleur propre des étoiles, couleur constante, des variations instantanées et souvent renouvelées que produit la scintillation. Cependant, cette constance de couleur n'est pas absolue. Il paraît certain qu'à la longue certaines étoiles changent de couleur. Sirius est le premier exemple constaté de cette modification. Les écrits des anciens[1] le représentent comme une étoile rouge, tandis qu'aujourd'hui ce soleil se distingue par son éclatante blancheur.

Deux étoiles doubles, γ du Lion et γ du Dauphin, notées comme blanches par Herschel, sont formées maintenant d'une étoile principale jaune d'or, accompagnée d'une étoile vert-rougeâtre dans le premier couple, vert-bleuâtre dans le second[1]. Du reste, cette variation de couleur ne semblera plus étonnante, si l'on se rappelle combien l'éclat de la lumière des étoiles subit lui-même de variations.

Cette variation ne semble pas pouvoir s'expliquer par la différence des instruments employés, puisque les miroirs des télescopes d'Herschel donnaient plutôt une teinte rougeâtre à tous les objets, et que c'est Struve, avec la grande lunette de Fraunhofer, qui a constaté la coloration des deux couples.

Il n'en reste pas moins à l'état de problèmes une foule de questions que suggère la diversité de couleurs des lumières stellaires. A quelles causes physiques ou chimiques tiennent ces différences ? Sont-elles seulement l'indice des températures plus ou moins élevées de l'incandescence des photosphères des soleils? Toutes ces nuances qui vont d'une extrémité à l'autre de l'*échelle* chromatique, du bleu au rouge, puis au blanc pur, correspondent-elles à des états physiques analogues à ceux où se trouve le platine, par exemple, lors-

1. « La Canicule (c'est le nom que les Latins donnaient à Sirius) est d'un rouge plus vif que Mars. » (Sénèque, *Questions naturelles*, I, 1.)

que du rouge sombre, par un accroissement progressif de chaleur, il arrive jusqu'au blanc éblouissant? Il est peu probable que les étoiles soient assimilables à des corps solides incandescents ; mais alors, leurs couleurs variées sont peut-être caractéristiques des substances gazeuses qui s'y trouvent en ignition.

On peut se demander aussi quelle est la cause des variations de couleurs des étoiles, si le passage d'une extrémité à l'autre de l'échelle spectrale marque une diminution ou un accroissement dans la température, dans la radiation de la photosphère, si les soleils bleus, comme on l'a supposé, sont des soleils en voie de décroissance. Toutes ces questions du plus haut intérêt ont été diversement résolues, mais en l'absence de faits positifs, les réponses étaient presque entièrement conjecturales, jusqu'au moment où l'analyse spectroscopique put aborder de tels problèmes, et apporter quelques faits nouveaux à l'appui des hypothèses. Le paragraphe qui suit va donner quelques détails sur cette nouvelle et importante branche de la science, qui a fait progresser si vite l'étude de la constitution de notre propre Soleil.

§ 2. ANALYSE SPECTRALE DE LA LUMIÈRE DES ÉTOILES.

Fraunhofer, après avoir découvert les innombrables raies sombres dont le spectre de la lumière solaire est sillonné, eut le premier l'idée d'étudier au même point de vue les spectres de la lumière des étoiles. Il trouva dans les spectres de Sirius, de Castor, de Pollux, de la Chèvre, de Betelgeuse et de Procyon, un certain nombre de raies noires diversement placées relativement aux couleurs et aux raies du spectre solaire ; mais il put reconnaître, dans les quatre dernières étoiles, l'identité de position d'une ou deux raies et notamment de la raie D, placée, comme on sait, au milieu du jaune du spectre solaire.

Fraunhofer publia ces résultats en 1823. Trente-sept ans plus tard, en 1860, l'astronome Donati étendit la même étude à un plus grand nombre d'étoiles, en choisissant toujours, à cause de leur plus grande intensité lumineuse, les étoiles de première grandeur, et il fixa relativement aux lignes du spectre solaire les positions exactes de 13 raies sombres, savoir: Sirius (3 raies), Wéga (3 raies), Procyon (3 raies), Régulus (2 raies), Fomalhaut (1 raie), Castor (2 raies), Ataïr (2 raies), la Chèvre (3 raies), Arcturus (2 raies), Pollux (2 raies), Aldébaran (2 raies), et Antarès (2 raies).

Tout ce qu'on pouvait conclure de ces premiers résultats, c'est que les lumières des étoiles étudiées avaient entre elles et avec la lumière du Soleil une certaine analogie, c'est qu'elles étaient des sources lumineuses de même ordre. Mais ces conséquences prirent tout à coup une importance extrême, quand la méthode d'analyse spectrale fut découverte par Kirchhoff et Bunsen, et que ces savants l'eurent appliquée à la constitution physique et chimique du Soleil. On put alors, en comparant les positions des raies des spectres stellaires aux raies brillantes des spectres des gaz et des métaux, étendre aux étoiles les conclusions déjà obtenues pour le Soleil, et connaître dans une certaine mesure la constitution physique et chimique de corps célestes dont la lumière met des années pour venir jusqu'à nous. Huggins et Miller en Angleterre, Secchi à Rome, Janssen, Wolf et Rayet à Paris, Vogel en Allemagne, d'Arrest, Rutherfurd sont les noms des savants à qui l'on doit, dans cet ordre de recherches, les découvertes les plus intéressantes, dont nous allons donner un résumé rapide.

Aldébaran. D'après MM. Huggins et Miller[1], la lumière d'un rouge pâle d'Aldébaran, analysée au spectroscope, présente de nombreuses et fortes lignes, particulièrement dans l'orangé, le vert et le bleu. Les positions mesurées de 70 de

1. *On the spectra of some of the fixed Stars,* mai 1864.

ces raies ont montré les coïncidences suivantes avec les raies brillantes de neuf éléments chimiques :

Sodium (double ligne D).
Magnésium (3 raies du groupe *b*).
Hydrogène (les lignes C et F).
Calcium (4 raies).
Fer (5 raies dont 2 E).
Bismuth (4 fortes raies).
Tellure (4 fortes raies).
Antimoine (3 raies).
Mercure (4 raies).

Les lignes de l'azote, du cobalt, de l'étain, du plomb, du cadmium, du barium et du lithium n'ont fourni aucune coïncidence avec les raies de l'étoile.

Betelgeuse (α Orion). Spectre extrêmement complexe et remarquable. De forts groupes de lignes se voient dans le rouge, le vert et le bleu. En outre, sept bandes sombres paraissant formées de lignes très-fines, sont réparties entre diverses régions du spectre, du rouge au bleu. Comme dans Aldébaran, les raies citées plus haut du sodium, du magnésium, du calcium, du fer et du bismuth se trouvent dans ce spectre ; mais, circonstance caractéristique, les raies de l'hydrogène sont absentes.

β *Pégase*. Le spectre de cette étoile a beaucoup d'analogie avec celui de α Orion : même disposition des groupes de lignes et des bandes sombres, et aussi même absence de l'hydrogène. La présence du sodium, du magnésium et probablement du barium a été constatée. Le Soleil et le plus grand nombre des étoiles analysées jusqu'ici ont dans leurs spectres les raies C et F de l'hydrogène ; l'absence des raies et par conséquent de la substance elle-même, dans les atmosphères de α Orion et β Pégase, mérite donc d'être remarquée[1].

1. MM. Huggins et Miller considèrent cette exception comme fort importante à un autre point de vue : « Si toutes les étoiles sans exception, disent-ils, donnaient ces lignes, on pourrait présumer qu'elles sont dues à l'atmosphère de la Terre ; l'exception démontre que les raies de l'hydrogène existent réellement dans la lumière de ces corps. » Cette remarque était faite en 1864, alors que la présence de l'hydrogène dans le Soleil n'avait point encore été mise hors de doute par l'analyse des protubérances.

Sirius (α Grand-Chien). Le spectre de cette brillante étoile est fort intense; mais, dans nos climats, le peu de hauteur de l'astre rend difficile l'observation des raies les plus fines. La double ligne D du sodium, les trois raies *b* du magnésium, C et F de l'hydrogène coïncident avec les principales lignes du spectre de Sirius, qui paraît aussi renfermer du fer.

Wéga (α Lyre) a un spectre pareil à celui de Sirius, et cette étoile a les mêmes éléments, sodium, magnésium et hydrogène.

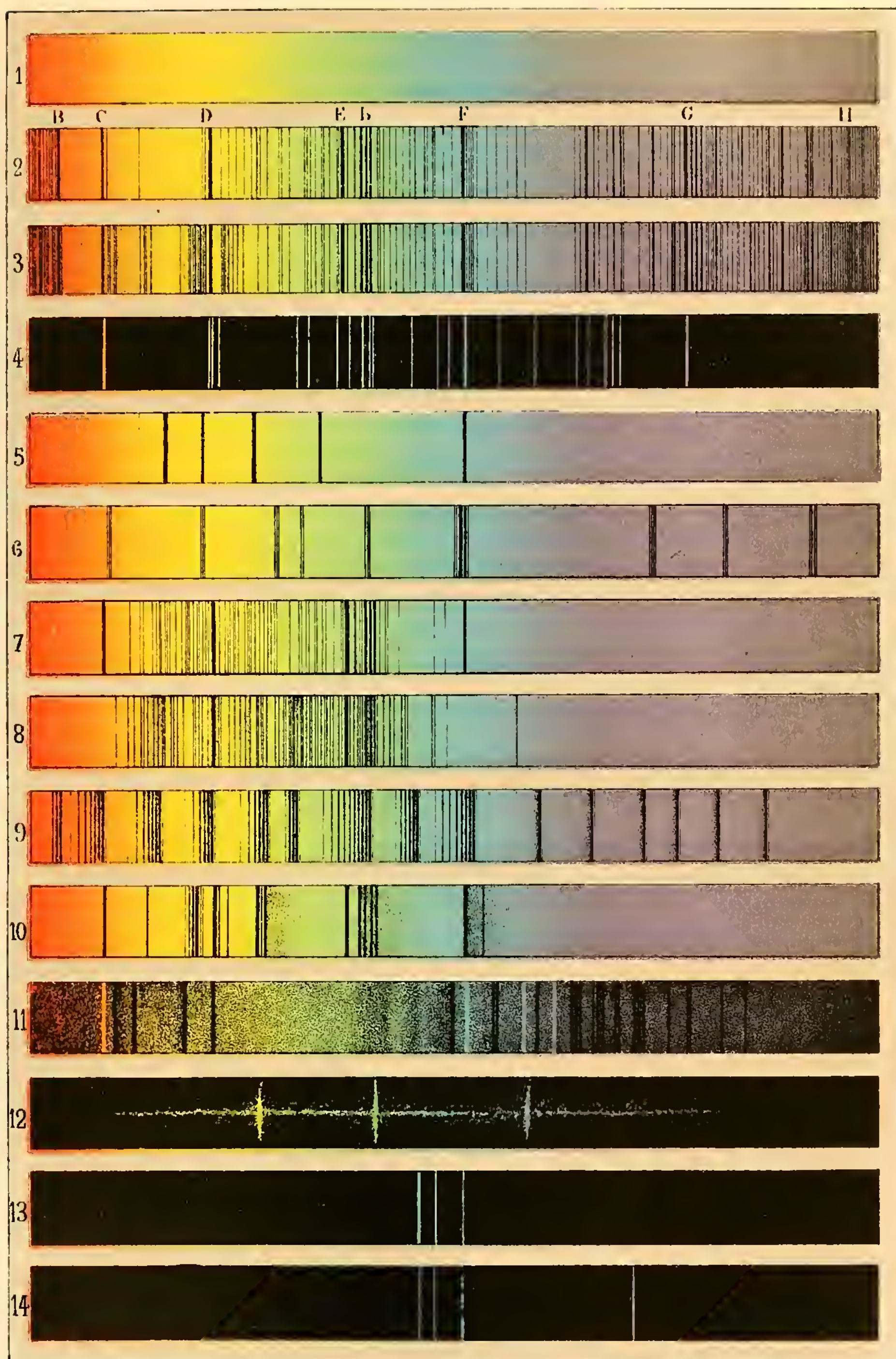
La *Chèvre*. Le spectre de cette étoile blanche est tout à fait semblable à celui de notre Soleil. Les raies y sont très-nombreuses; et parmi celles que MM. Huggins et Miller ont mesurées, se trouve la double ligne D du sodium. La même coïncidence a été trouvée par eux dans α du *Cygne* et dans *Procyon*.

Le spectre de *Pollux*, riche en raies, accuse l'existence du sodium, du magnésium et probablement du fer. Enfin la double raie du sodium se trouve aussi dans le spectre d'Arcturus, qui a quelque ressemblance avec le spectre solaire.

Une quarantaine d'autres étoiles ont eu leurs lumières analysées à la même époque, par les savants dont nous venons de résumer les observations; mais, depuis douze ans, les recherches du même genre ont été considérables, et fourniraient la matière d'un ouvrage important. Continuons de donner une idée des principaux résultats obtenus.

D'après le P. Secchi, qui a étudié les spectres de plus de trois cents étoiles de diverses grandeurs, on peut ranger les étoiles en trois ou plutôt en quatre classes principales :

La première classe comprend les étoiles blanches ou azurées, et a pour type Sirius; telles sont aussi Wéga, Ataïr, Régulus, Rigel, les étoiles de la Grande-Ourse (α excepté), celles d'Ophiucus, etc. Le spectre de leur lumière est traversé par quatre fortes raies sombres situées, l'une dans le rouge, la seconde dans le bleu à la limite du vert (raie F du spectre



SPECTRES CÉLESTES

RAIES PRINCIPALES

des Spectres du Soleil, des Etoiles, des Cometes et des Nébuleuses.

1 Spectre continu (*Solide ou liquide incandescent*) _ 2 Speectre du Soleil _ 3 Spectre du Soleil à l'horizon (*Raies Telluriques d'après Janssen*) _ 4 Spectre de la Chromosphère Solaire _ 5 Spectre de la Planète Uranus (*d'après Huggins*) _ 6 Spectre de Sirius _ 7 Spectre d'Aldébaran (*d'après Huggins*) _ 8 Spectre de Bételgeuse (*α d'Orion, id*) _ 9 Spectre de l'Etoile α d'Hercule, (*d'après Secchi*) _ 10 Spectre de l'Etoile 152 Schjellerup (*d'après Huggins*) _ 11 Spectre de T de la Couronne _ 12 Spectre de la Comete de Coggia (*d'après G Rayet*) _ 13 Spectre de la Nébuleuse (37 M) du Dragon _ 14 Spectre de la G^de Nébuleuse d'Orion

solaire), la troisième dans le violet (voisine de H); la quatrième, dans l'extrême violet, est visible dans le spectre des plus brillantes étoiles. Ce sont les quatre raies les plus brillantes de l'hydrogène. D'après Secchi, la moitié à peu près des étoiles du ciel se rapportent à ce type.

La seconde classe renferme les étoiles à lumière jaune, et a pour types principaux Arcturus, Pollux, la Chèvre, α Grande-Ourse, Procyon ; la plupart des belles étoiles de seconde grandeur en font partie. Leurs spectres sont, comme le spectre solaire, sillonnés de raies fines et nettes. Dans Arcturus, trente raies, choisies parmi les principales, coïncident avec des raies solaires. Cette classe contient le tiers des étoiles du ciel.

Les étoiles rouges, comme Betelgeuse, Antarès, Algol, α Hercule, β Pégase, composent la troisième classe, et ont généralement un spectre formé de larges zones brillantes, au nombre de six ou sept, séparées par des intervalles nébuleux, semi-obscurs : on a vu plus haut la description, d'après Huggins et Miller, des spectres de deux de ces étoiles. L'aspect de ces spectres est celui de cannelures ou d'une série de colonnes éclairées par côté. Les étoiles de cette classe sont moins nombreuses que celles des deux autres, et se confondent quelquefois avec la seconde. Ainsi Aldébaran participe à la fois de la seconde et de la troisième classe. Ce troisième type comprend, d'après Secchi, des étoiles qui sont toutes variables, et dont la couleur tire plus ou moins sur le rouge ou l'orangé.

En résumé, Secchi a trouvé, sur 316 étoiles observées, 164 étoiles appartenant à la première classe et ayant pour type Wéga de la Lyre, 140 étoiles de la seconde classe, dont le type est notre Soleil, et 12 étoiles seulement dans la troisième classe, caractérisée par α d'Hercule.

La quatrième classe, que nous n'avons pas encore indiquée, comprend un petit nombre de petites étoiles de couleur rouge-sang, dont le spectre ne diffère de celui de la troisième que par le plus petit nombre des zones claires, et par cette parti-

cularité « que la lumière des zones commence brusquement du côté du violet et va en s'affaiblissant insensiblement du côté du rouge, tandis que, dans les spectres du troisième type, les mêmes circonstances se présentent dans le sens inverse. »

Cette classification générale rencontre toutefois quelques exceptions qui n'en offrent que plus d'intérêt : le spectre de γ de Cassiopée est parfaitement complémentaire du spectre de la première classe. A la place des raies sombres F et C du spectre solaire, on voit deux bandes lumineuses. Il en est de même de β de la Lyre et de trois petites étoiles du Cygne, de 8e grandeur, dont les spectres, selon MM. Wolf et Rayet, présentent des raies brillantes[1].

L'absence d'hydrogène dans les étoiles de la troisième classe et la composition chimique des unes et des autres, ont suggéré à M. Huggins les réflexions suivantes : « Je me hasarde à peine, dit-il, à émettre l'idée que les planètes qui peuvent circuler autour de ces soleils leur ressemblent très-probablement, et, comme elles, ne possèdent point cet élément d'une si haute importance, l'hydrogène. A quelles formes de la vie de semblables planètes peuvent-elles convenir? Mondes sans eau! il faudrait la puissante imagination du Dante pour arriver à peupler de telles planètes de créatures vivantes. A part ces exceptions, il est digne d'observer que ceux des éléments terrestres le plus largement répandus dans la vaste armée des étoiles, sont précisément les éléments essentiels à la vie, telle qu'elle existe sur la Terre : l'hydrogène, le sodium, le magnésium et le fer. L'hydrogène, le sodium et le magnésium repré-

1. La classification en quatre types proposée par Secchi, est loin d'être adoptée, nous devons le dire, par tous les astronomes qui se sont occupés d'analyse spectrale stellaire. MM. Vogel, Rutherfurd, d'Arrest ont fait des objections et contesté ses conclusions. M. Huggins a donné le spectre d'une des étoiles rouges que Secchi range dans le quatrième type 152 (Schjellerup), et ce spectre, que nous reproduisons dans la planche XLIV, diffère notablement de celui de Secchi.

sentent en outre l'Océan, qui est une partie essentielle d'un monde constitué comme l'est la Terre[1]. »

L'explication des couleurs variées dont nous avons vu que brillent les lumières stellaires, doit se rattacher, selon Huggins, à la composition de leur spectre. Au moment de son émission, la lumière serait blanche pour toutes les étoiles; mais avant de se répandre dans l'espace, elle doit traverser les atmosphères très-diversement composées de chacun de ces soleils. C'est ce trajet qui détermine l'absorption de tels ou tels rayons, selon la nature chimique des vapeurs des atmosphères solaires, et produit pour nous les raies sombres de chaque spectre. Comme ces raies sont plus ou moins intenses et plus ou moins nombreuses dans les diverses régions du spectre, il en résulte, pour la couleur de ces régions, une diminution d'intensité qui laisse la prédominance aux autres couleurs, moins absorbées. Les étoiles blanches seraient celles où les raies se trouvent à peu près également disséminées dans toute la longueur du spectre. Donnons quelques exemples: dans le spectre d'α Orion, le vert et le bleu sont comparativement sombres, à cause des groupes de raies noires serrées et nombreuses dans ces régions; elles sont beaucoup plus rares dans l'orangé. La même circonstance se présente pour β Pégase. Aussi ces deux étoiles sont-elles, la première de couleur orangée, la seconde jaune. Aldébaran est d'un rouge pâle. Aussi le spectre de cette étoile renferme peu de lignes (sauf C de l'hydrogène) dans le rouge, tandis que la région de l'orangé est considérablement assombrie par des lignes sombres, beaucoup moins nombreuses dans le vert et dans le bleu. Dans le spectre de Sirius, sauf cinq

1. D'après les récentes études de spectroscopie stellaire, dues au P. Secchi, ce ne serait pas seulement les substances simples et les métaux dont l'existence dans les étoiles se manifesterait par la présence de telles ou telles raies dans leurs spectres, mais probablement aussi des substances gazeuses composées, des hydrocarbures. « Un grand nombre d'étoiles, dit-il, présentent une bande noire dans le vert, très-près du magnésium ; il est probable que c'est plutôt cette vapeur hydrocarburée que le magnésium, qui la produit. »

lignes un peu fortes, les raies sont très-fines, et à peu près également réparties dans toute l'étendue du spectre[1].

Une étude comparative des spectres des composantes d'étoiles doubles a permis également à Huggins de constater que la couleur bleue de la plus petite étoile, de l'étoile satellite, est réelle et non pas produite par un effet de contraste. Il prend pour exemple les composantes de l'étoile double α d'Hercule. Le spectre de la principale est remarquable par des groupes intenses de raies sombres dans le vert, le bleu et le violet : le

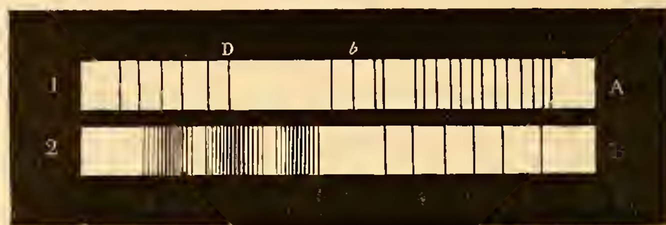


Fig. 296. Spectres des deux composantes de l'étoile double β du Cygne. A, étoile principale, couleur orangée ; B, satellite de couleur bleue.

jaune, l'orangé et le rouge n'ont que quelques faibles raies ; ainsi, la disposition des bandes d'absorption s'accorde avec la

1. Nous avons vu que la scintillation est un phénomène d'interférence dû à la différence de vitesse des rayons colorés, dans leur passage à travers les couches hétérogènes de l'atmosphère. M. Montigny a étudié le phénomène au point de vue de la fréquence relative des mouvements très-rapides qui le constituent, et il a remarqué que cette fréquence varie selon la nature des spectres des étoiles observées. Elle est moindre dans les étoiles de la 3e classe de Secchi, dont α Hercule est le type, plus forte dans celle de la 2e classe représentée par Pollux, et atteint son maximum dans celles de la 1re classe telles que α Lyre. La moyenne représentant pour chaque classe le nombre des mouvements scintillatoires est 56, 69 et 86. L'étoile ε Grande-Ourse a donné le nombre le plus élevé, celui de 111 oscillations par seconde. En résumé, les étoiles qui scintillent le moins sont celles dont le spectre renferme des lignes nombreuses, interrompues par des zones sombres ; puis viennent les étoiles à spectres sillonnés de raies fines, et enfin, au premier rang, celles qui, comme Sirius et Wéga, ont leurs spectres formés d'un petit nombre de fortes lignes.

couleur de cette étoile où l'orangé prédomine. La lumière du satellite est, au contraire, bleu-verdâtre. Or, son spectre est sillonné de plusieurs groupes de lignes dans le rouge et dans l'orangé, tandis que la région la plus réfrangible est rendue très-brillante par l'absence de fortes raies. Une analyse semblable, faite sur les composantes de β du Cygne, l'une orangée, l'autre bleue, ont conduit M. Huggins aux mêmes conclusions.

§ 3. ANALYSE SPECTRALE DE LA LUMIÈRE DES ÉTOILES VARIABLES.

L'analyse spectrale de la lumière des étoiles variables ou temporaires ne donne pas de moins intéressants résultats que ceux qui se rapportent aux étoiles simples ou doubles à lumière constante. On a vu plus haut que, d'après Secchi, les étoiles dont le spectre appartient au troisième type, sont généralement variables. Mais il était important de comparer l'état de leurs lumières aux diverses phases de leurs périodes. Considérons, avec cet astronome, deux des plus célèbres, Algol dont la période est courte et régulière, et ο de la Baleine, étoile variable à longue période.

« Algol, examinée plusieurs fois, à l'époque de son minimum d'éclat, a toujours montré (comme dans son maximum) le même type, celui d'α de la Lyre. » La conclusion à tirer de cette constance dans le spectre de l'étoile, c'est, selon Secchi, que la variation n'est pas due à un changement réel dans la constitution de l'étoile, ni à un mouvement de rotation qui montrerait et cacherait alternativement une région de l'étoile couverte de taches. L'astronome romain l'attribue aux éclipses d'un corps opaque faisant sa révolution autour de l'étoile en 2 jours 21 heures, dans un plan qui passe par la Terre. « Cette idée, dit M. Delaunay, déjà émise antérieurement, s'accorde d'ailleurs très-bien avec la régularité du phénomène et avec le peu de durée de la phase de diminution (un

peu moins de 7 heures) relativement à la durée totale d'une période. »

Il n'en est pas ainsi de Mira. Son spectre est du troisième type, à cannelures cylindriques parfaitement tranchées, avec les mêmes raies noires que dans celui de l'étoile type α Hercule. « Mais au fur et à mesure, dit Secchi, que l'étoile gagne en éclat, les raies noires du jaune et les premières du vert paraissent diminuer de netteté et devenir moins noires. Ce fait est très-intéressant : il indiquerait ici une source de variabilité différente de celle d'Algol. » Le même savant signale comme remarquable le fait que les étoiles variables à période irrégulière (comme α Orion, α Hercule, Mira, etc.) sont des étoiles du même type, à zones multiples. « Cette constitution spectrale, dit-il, indiquant de vastes atmosphères absorbantes, conduit à penser que leur variabilité vient probablement de crises que subit l'atmosphère dont elles sont environnées. »

Nous allons voir de telles crises se manifester dans les étoiles nouvelles ou temporaires, sur une échelle beaucoup plus vaste, mais avec l'absence de toute périodicité régulière.

La récente apparition de l'étoile nouvelle T de la Couronne boréale, a été l'occasion heureuse de ces découvertes. Citons les observateurs eux-mêmes, MM. Huggins et Miller : « Le spectre de l'étoile variable de la Couronne se montre formé de deux spectres superposés, le premier formé de quatre raies brillantes, le second analogue au spectre du Soleil, chacun d'eux résultant de la décomposition d'un faisceau lumineux indépendant de la lumière qui donne naissance à l'autre. Le spectre continu sillonné de groupes de raies obscures, indique la présence d'une photosphère de matière incandescente, presque certainement solide ou liquide, entourée d'une atmosphère de vapeurs plus froides, qui font naître par absorption les groupes des raies sombres. Jusqu'ici, la constitution de cet astre est analogue à celle du Soleil; mais il offre un spectre additionnel formé de raies brillantes. Il y a donc là

une seconde source de lumière spéciale, et cette source doit être un *gaz lumineux*. En outre, les deux principales raies brillantes de ce spectre nous apprennent que ce gaz était composé surtout d'hydrogène, et leur grand éclat prouve que la température du gaz lumineux a été plus élevée que celle de la photosphère. Ces faits, rapprochés de la soudaineté de l'explosion de lumière dans l'étoile, de sa diminution d'éclat immédiate et si rapide, de sa chute, en douze jours, de la seconde à la huitième grandeur, nous conduisent à admettre que l'astre s'est trouvé subitement enveloppé des flammes de l'hydrogène en combustion. Il se pourrait qu'il eût été le siége de quelque grande convulsion, avec dégagement énorme de gaz mis en liberté. Une grande partie de ce gaz était de l'hydrogène, qui brûlait à la surface de l'étoile en se combinant avec quelque autre élément. Ce gaz enflammé émettait la lumière caractérisée par le spectre des raies brillantes. Le spectre de l'autre portion de la lumière stellaire indiquerait que cette terrible déflagration gazeuse avait surchauffé et rendu plus vivement incandescente la matière solide de la photosphère. Lorsque l'hydrogène libre eut été épuisé, la flamme s'abattit graduellement, la photosphère devint moins lumineuse, et l'étoile revint à son premier état. » — « Nous ne devons pas oublier, ajoute M. Huggins, que la lumière, messager cependant si rapide, exige un certain temps pour venir de l'étoile à nous. Cette grande convulsion physique, nouvelle pour nous, était donc déjà un événement passé relativement à l'étoile elle-même. En 1866, elle était depuis des années déjà dans les conditions nouvelles que lui a faites cette violente catastrophe ! »

Cette dernière remarque s'applique à tous les phénomènes du monde sidéral. Les rayons de lumière qui émanent des étoiles nous arrivent, à chaque instant, après avoir accompli des voyages dont la durée se compte par années, nous l'avons vu, et probablement par siècles. Nous ne voyons donc jamais le ciel *tel qu'il est*, mais *tel qu'il a été* à une multitude

d'époques différentes. Ainsi que l'a dit Arago, « l'aspect du ciel, à un instant donné, nous raconte pour ainsi dire l'histoire ancienne des astres. »

Sans doute, les étoiles nouvelles de 1572, de 1604, l'étoile temporaire et si extraordinairement variable η du Navire sont des soleils qui, comme l'étoile de la Couronne, ont été le théâtre d'immenses conflagrations, où l'hydrogène a pu jouer un rôle important. Ces phénomènes ont désormais pour nous et notre monde solaire un haut intérêt, depuis qu'on a constaté l'existence d'une couche de ce gaz et son incandescence tout autour de la photosphère du Soleil.

Ce paragraphe était écrit, quand une récente et importante découverte est venue nous obliger à le compléter par des détails que nos lecteurs liront, croyons-nous, avec intérêt. Une étoile vient de faire son apparition dans le Cygne. Vue à Athènes pour la première fois par M. Schmidt, le 24 novembre 1876 (près de l'étoile ρ de la même constellation), l'étoile nouvelle, très-jaune, était alors de la 3e grandeur, plus intense que η Pégase. M. Paul Henry l'a observée à Paris vers la fin de novembre; elle lui a paru de 5e grandeur et de couleur verdâtre, presque bleue. Le 2 décembre, M. Cornu, et indépendamment M. Cazin, ont analysé sa lumière. « Dans une très-courte et demi-éclaircie, dit M. Cornu, j'ai pu observer le spectre de l'étoile pendant quelques instants. Il m'a paru formé en grande partie de lignes brillantes, et, par conséquent, provenir vraisemblablement d'une vapeur ou d'un gaz incandescent. » De nouvelles observations ont permis à notre savant compatriote une étude spectroscopique plus précise, dont voici les principaux résultats.

« Le spectre de l'étoile, dit-il, se compose d'un certain nombre de lignes brillantes, se détachant sur une sorte de fond lumineux, interrompu presque complétement entre le vert et l'indigo, de sorte qu'à première vue, le spectre paraît

composé de deux parties séparées. » Huit raies brillantes qu'il désigne dans l'ordre de leur éclat par les lettres α, β, γ, δ, ε,

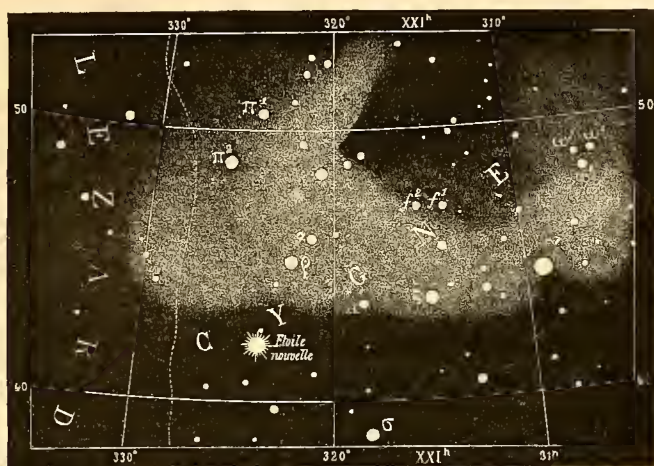


Fig. 297. Position de l'étoile nouvelle du Cygne, d'après les observations de M. J. Schmidt, (grandeur de l'étoile à la date du 24 novembre 1876).

η, ζ, θ, correspondaient aux longueurs d'onde suivantes (exprimées en millionièmes de millimètre) :

α	δ	γ	β	ζ	η	θ	ε
661	588	531	517	500	483	451	434

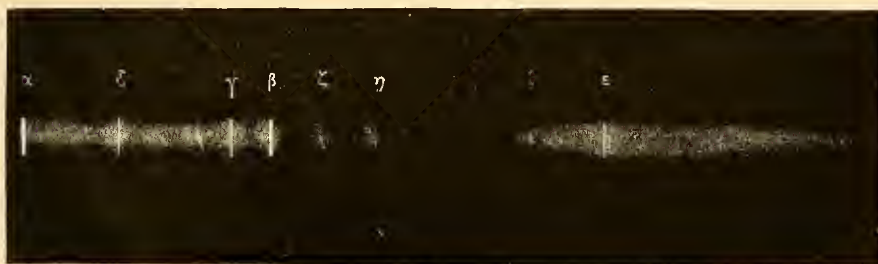


Fig. 298. Spectre de la nouvelle étoile du Cygne, d'après les observations et les mesures de M. Cornu.

α, η et ε se trouvent ainsi correspondre presque identiquement avec trois raies de l'hydrogène (C, F et 434). δ est la raie du sodium ou peut-être plutôt celle de la raie D_3 (hélium) de la

chromosphère solaire ; β correspond à la triple raie *b* du magnésium ; mais, ce qui est d'un haut intérêt, c'est la coïncidence probable des raies γ et θ avec deux raies, dont l'une (1474 de Kirchhoff) est une des raies caractéristiques de la chromosphère et de la couronne, et la seconde appartient aussi à la chromosphère. « En résumé, la lumière de l'étoile paraît posséder exactement, dit M. Cornu, la même composition que celle de l'enveloppe du Soleil nommée chromosphère[1]. »

1. Le savant observateur ajoute : « Malgré tout ce qu'il y aurait de séduisant et de grandiose à tirer de ce fait des inductions relatives à l'état physique de cette étoile nouvelle, à sa température, aux réactions chimiques dont elle peut être le siége, je m'abstiendrai de tout commentaire et de toute hypothèse à ce sujet. Je crois que nous manquons de données nécessaires pour arriver à une conclusion utile, ou tout au moins susceptible de contrôle. Quelque attrayantes que soient ces hypothèses, il ne faut pas oublier qu'elles sont en dehors de la science, et que loin de la servir, elles risquent fort de l'entraver.»

Tous les esprits sérieux adhéreront aux réserves de M. Cornu. La découverte qu'il a faite, si elle est confirmée par des mesures ultérieures, est par elle-même assez importante, et l'induction qu'il en tire sur l'identité de composition de la lumière de l'étoile nouvelle avec l'atmosphère solaire, est assez *attrayante* pour n'avoir pas besoin de commentaire ; mais nous protestons contre cette idée que les hypothèses entravent la science ; quand elles sont rationnelles, c'est-à-dire quand elles sont basées à la fois sur les faits nouvellement observés et sur les lois mathématiques ou physiques antérieurement démontrées, les hypothèses font partie intégrante de la vraie méthode ; bien loin de faire obstacle à la science, elles sont une cause incessante de progrès scientifiques.

LIVRE DEUXIÈME

LES NÉBULEUSES

Si l'on parcourt des yeux, quand le ciel est bien pur, l'espace qui sépare, dans la constellation d'Andromède, le carré de Pégase de Cassiopée, on ne tarde pas à apercevoir, un peu à côté de la ligne joignant ces deux constellations, et tout près de l'étoile de 4e grandeur ν d'Andromède, une masse lumineuse, un petit nuage blanchâtre de forme allongée. L'œil nu n'y peut distinguer aucune étoile. En s'aidant d'une lunette, même assez puissante, on voit bien la forme se préciser, l'ovale se circonscrire; mais la lueur douce et pâle de ce petit nuage céleste reste toujours vaporeuse, sans laisser soupçonner aucune lumière stellaire.

C'est une *nébuleuse*, bien connue sous le nom de nébuleuse d'Andromède, et célèbre dans l'histoire de l'Astronomie, pour être le premier objet de ce genre qui ait attiré l'attention des astronomes. Les espaces célestes sont parsemés d'une multitude d'objets semblables, variés de dimensions, de formes et d'éclat, mais offrant tous cette apparence de nuage lumineux qui leur a valu le nom commun de nébuleuses. On dirait autant de petits fragments détachés de la grande zone qui fait le tour entier du ciel sous le nom de Voie Lactée.

Plusieurs nébuleuses sont, comme celle d'Andromède, visibles à l'œil nu. Il peut donc paraître étrange que ni les astronomes de l'antiquité, ni les astronomes modernes ne les aient aperçues, jusqu'à l'année 1612, où Simon Marius, en se servant d'une lunette, découvrit la nébuleuse que nous venons de décrire. La vérité est que les anciens avaient marqué, dans leurs catalogues, ce qu'ils appelaient des *étoiles nébuleuses* (νεφελοειδεῖς dans Ptolémée, *stellæ nebulosæ* dans Galilée); mais ils entendaient par là des agglomérations de



Fig. 299. Nébuleuse d'Andromède.

petites étoiles, que les faibles vues avaient peine à séparer. L'amas de la poignée de Persée, celui du Cancer, la chevelure de Bérénice et même les Pléiades sont encore, pour ceux qui ont une vue médiocre, des groupes de ce genre; les étoiles qui les composent confondant leurs images dans un espace resserré, produisent l'apparence d'une lueur confuse, là où une vue plus perçante, l'emploi de faibles lunettes, ou même de simples besicles, suffit pour distinguer des points lumineux.

Quarante-quatre ans après l'observation de Simon Marius,

Huygens découvrit, dans l'épée d'Orion, une nouvelle nébuleuse, celle qui environne l'étoile multiple θ; une troisième, observée en 1665 par Abraham Ihle, avait été remarquée longtemps auparavant par Hévélius, près de la tête du Sagittaire. En 1716, Halley en comptait 6 : les trois que nous venons de citer, une quatrième découverte par lui en 1677 dans le Centaure, une cinquième vue par Kirsch en 1681, près du pied boréal de Ganymède ou d'Antinoüs, et enfin une sixième, découverte aussi par Halley, dans la constellation d'Hercule.

A partir de cette époque, les découvertes se multiplièrent. Lacaille au cap de Bonne-Espérance, Messier, Bode et Méchain en Europe, en portèrent le nombre à deux cents; mais, dès la fin du dix-huitième siècle, grâce à la prodigieuse activité de W. Herschel, on comptait 2500 nébuleuses recensées; aujourd'hui, les catalogues en contiennent plus de 5000[1].

Mais que sont les nébuleuses?

Sont-ce des groupes d'étoiles condensées, que l'extrême petitesse de leurs composantes, le resserrement produit par la distance, ou ces deux raisons à la fois rendent séparément invisibles? En un mot, les nébuleuses doivent-elles être assimilées aux groupes stellaires que nous avons précédemment décrits, tels que les Pléiades, Persée, la Crèche, les Hyades?

Ou bien, sont-ce des agglomérations de matière diffuse,

1. Lacaille avait découvert 42 nébuleuses dans le ciel austral; Messier, dans son catalogue de 1771, en enregistrait 96, nombre que le célèbre trouveur de comètes portait à 103, dans son catalogue de 1784 (*Connaissance des Temps*). Le grand astronome de Slough, W. Herschel, avait observé 1000 nébuleuses en 1786, et trois ans plus tard, il doublait ce nombre; enfin, en 1802, le nombre total des nébuleuses observées par lui se montait à 2508. Le catalogue général publié en 1864 par sir J. Herschel en renferme 5076, et l'on peut évaluer aujourd'hui à 5500 le nombre total des nébuleuses connues. Sir J. Herschel, Dunlop, lord Rosse, MM. d'Arrest, Auwers, Bond, Schönfeld ont contribué à accroître les découvertes de ce genre. Notre compatriote, M. Stéphan, directeur de l'Observatoire de Marseille, en a découvert 300 nouvelles dans ces dernières années.

des sortes de nuages, lumineux par eux-mêmes, analogues aux nébulosités cométaires, auxquelles l'aspect d'un grand nombre d'entre elles les fait ressembler? Ce sont là deux hypothèses bien différentes, qui ont eu, l'une et l'autre, leurs partisans exclusifs, et qui partageraient sans doute encore les astronomes, si les observations et les faits ne s'étaient chargés de répondre aux questions posées. Il y a peu de temps encore, les opinions à cet égard n'étaient pas concordantes, et l'investigation télescopique laissait place au doute. Mais l'analyse spectrale de la lumière des nébuleuses est venue jeter le poids de ses observations dans la question, en prouvant que les deux hypothèses sont vraies toutes deux. Réservons pour un dernier chapitre les récentes découvertes de la nouvelle méthode, et interrogeons d'abord le télescope.

Prenons pour exemple la nébuleuse découverte par Halley en 1714, dans la constellation d'Hercule. Bien que visible à l'œil nu, Messier, qui l'avait observée à la lunette, la décrit dans son catalogue comme *une nébuleuse sans étoiles*. Elle aurait donc pu, il y a un siècle, être donnée, ainsi que la nébuleuse d'Andromède, comme le type d'une masse réellement vaporeuse, d'une nébulosité véritable. Or, sir J. Herschel la décrit ainsi dans son catalogue de 1833 : « Très-riche amas de figure irrégulière, formé de plusieurs milliers d'étoiles de la 10e à la 15e grandeur. » On peut voir dans le dessin n° 2 de la planche XLIV, une représentation de cette splendide association stellaire, que nous donnons également dans la planche XLIV *bis*, d'après un beau dessin de M. B. Stoney. L'amas stellaire du Verseau, d'après le dessin de sir J. Herschel (pl. XLIV), paraît déjà formé d'une agglomération sphérique de très-petites étoiles. Vu dans le puissant réflecteur de Parsonstown, il apparaît entièrement constitué d'étoiles innombrables, mais distinctes et nettement séparées (fig. 300).

Nombre d'autres nébuleuses, que des instruments de faible puissance montrent comme des taches lumineuses indistinctes,

ont été décomposées en étoiles par des télescopes d'un pouvoir optique supérieur. On leur donne pour cette raison le nom d'*amas stellaires* (en anglais *clusters*, en latin *cumuli*). Or le nombre des amas a été en croissant, à mesure que s'est accrue la puissance des instruments. W. et J. Herschel ont décomposé en amas beaucoup de nébuleuses qu'on croyait des nébuleuses sans étoiles. Le télescope de lord Rosse (nous en verrons plus loin des exemples) a décomposé de même des nébuleuses, que les deux astronomes qu'on vient de citer

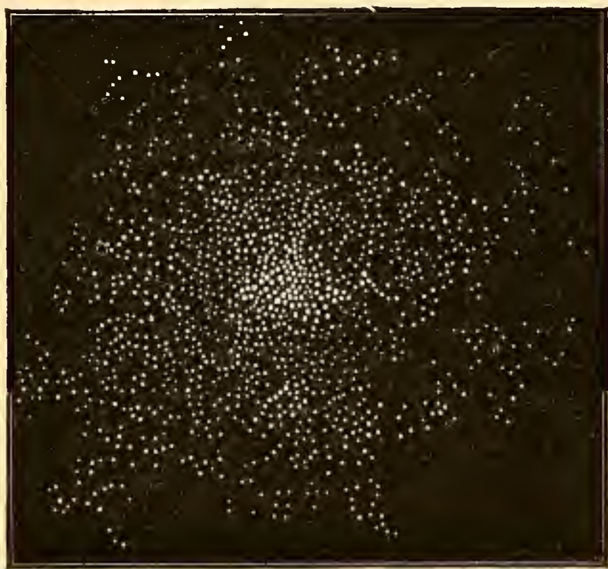


Fig. 300. Amas stellaire du Verseau (2 M 2125 H) vu dans le grand télescope de lord Rosse.

avaient trouvées irréductibles. De là cette opinion que toutes les nébuleuses sont des agrégations stellaires et que l'énorme distance où elles sont reléguées, la condensation ou la petitesse des soleils dont elles sont formées, sont seules causes de l'impossibilité où l'on se trouve actuellement d'en opérer la décomposition [1].

1. C'était, à l'origine, la pensée de W. Herschel, pensée qui se modifia peu à peu, à mesure que les observations du grand astronome s'accumulèrent; et, dès 1771, il disait dans un de ses mémoires : « Il y a des nébulosités

Cette opinion a persisté jusqu'à ces dernières années chez un certain nombre d'astronomes, malgré les présomptions contraires tirées de l'aspect particulier offert par certaines nébuleuses irréductibles. Tandis que les nébuleuses résolubles sont généralement de forme régulière, arrondie ou ovale, et que leur lumière offre, ainsi que le remarquait J. Herschel, « des élancements stellaires, » les grandes nébuleuses irréductibles, telles que celle d'Orion, outre l'irrégularité de leur forme, « produisent, selon le même observateur, une sensation toute différente et ne font naître aucune idée d'étoiles. »

On comprend toutefois que cette distinction, tout optique, entre les nébuleuses *résolubles* et les nébuleuses *irréductibles* reste à un certain degré arbitraire. Il est préférable de donner le nom d'*amas stellaires* à toutes celles qui ont été effectivement décomposées en étoiles : on en compte aujourd'hui plus de 500. A toutes celles qui ne sont point décomposées par les télescopes les plus puissants, nous conserverons le nom de nébuleuses, en confondant sous cette dénomination, aussi bien celles qui sont *optiquement* que celles qui peuvent être, suivant l'expression de J. Herschel, *physiquement* nébuleuses. Mais, outre cette classification, relative à l'apparence télescopique, il est possible de ranger les nébuleuses en classes ou catégories, en ayant égard à la forme, à l'éclat, aux dimensions, au degré de condensation de la lumière. C'est ce qu'a fait sir J. Herschel, dans le but de rendre plus facile la comparaison des nombreux matériaux recueillis dans ses catalogues. Il établit d'abord deux grandes classes, relatives à la forme : la première classe comprend toutes les nébuleuses assez régulières, assez symétriques, pour que leur forme soit susceptible de définition ; la seconde classe comprend les nébu-

(des blancheurs) qui ne sont pas de *nature stellaire* » (cité par Arago). Nous le verrons plus loin préciser sa pensée et distinguer nettement des nébuleuses stellaires, celles qu'il considère comme formées d'une matière lumineuse diffuse.

leuses irrégulières. Nous indiquerons plus loin, à mesure que nous aurons l'occasion de les décrire, les subdivisions de ces deux classes de nébuleuses.

Nous avons dit que nombre de nébuleuses pourraient, au premier abord, être prises pour des comètes. Mais on a déjà vu comment une nébulosité cométaire peut se distinguer d'une véritable nébuleuse. Tandis que la première a un mouvement propre assez rapide, la nébuleuse est fixe, ou du moins, si elle possède un mouvement propre, il s'effectue avec une lenteur comparable aux mouvements propres stellaires. Nous dirons plus loin un mot de cette question intéressante : la détermination du mouvement des nébuleuses.

I

AMAS STELLAIRES ET NÉBULEUSES RÉSOLUES.

§ 1. AMAS D'ÉTOILES DE FORME GLOBULAIRE OU SPHÉRIQUE.

Sur un nombre total d'environ 5000 nébuleuses recensées, on en compte aujourd'hui au moins 560, entre la huitième et la neuvième partie, que le télescope est parvenu à décomposer entièrement en étoiles[1]. Parmi ces amas, un très-petit nombre, nous l'avons dit, sont assez lumineux et assez considérables pour être visibles à l'œil nu. Dans tous, les étoiles sont si rapprochées qu'il est impossible de n'y pas voir de véritables groupes stellaires, de réelles associations, des systèmes de

1. Le catalogue général de sir J. Herschel, publié en 1864, contient 5076 nébuleuses qui se décomposent ainsi :

Amas stellaires	535
Amas stellaires globulaires.	30
Amas globulaires résolubles	72
Nébuleuses résolubles	397
Nébuleuses irréductibles ou non résolues. . .	4042

D'après cette classification, 566 nébuleuses ont été résolues en étoiles, et 468 autres sont considérées comme décomposables. Cela fait 1034 objets qui sont presque assurément des agrégations d'étoiles plus ou moins condensées : la proportion monte jusqu'au cinquième du nombre total des nébuleuses, et il est probable que des moyens optiques plus puissants réduiraient encore le nombre des vraies nébuleuses.

soleils. Leur forme généralement arrondie leur donne un aspect cométaire, et les observateurs qui ne seraient point familiers avec la composition détaillée des diverses régions du ciel s'y tromperaient aisément. Mais la permanence de leur forme, et surtout de leur position, est un caractère qui suffit à les distinguer des comètes.

Il est aussi des amas, mais ce sont les moins nombreux, dont les contours sont très-irréguliers ; dans ceux-ci, le nombre des étoiles est ordinairement beaucoup moindre que dans les amas de forme globulaire, et leur distribution y est aussi fort différente. Qu'on jette les yeux sur les dessins (1, 2, 3) de la planche XLIV. On sera frappé de la condensation remarquable des points lumineux vers le centre. Cette condensation s'explique aisément, si l'on suppose que la forme réelle de l'agglomération est celle d'un globe à peu près sphérique. Alors, même dans l'hypothèse où les étoiles seraient également espacées à l'intérieur de cette sphère, on comprend que le rayon visuel la traverse dans toute l'étendue de son diamètre en face du centre, tandis qu'en s'approchant des bords, il en parcourt des portions de plus en plus petites. La perspective seule suffit donc, en général, à rendre compte de l'agglomération apparente des points lumineux, au centre d'un amas de forme globulaire ou sphérique.

Mais l'accroissement d'éclat du bord au centre est souvent plus rapide que ne permet de l'admettre une égale distribution des étoiles à l'intérieur des amas stellaires. On en a conclu qu'outre la condensation apparente ou purement optique, il existe une condensation réelle qui s'est sans doute produite à la longue, sous l'influence des forces centrales, résultantes des attractions isolées de tous les soleils qui composent de tels systèmes.

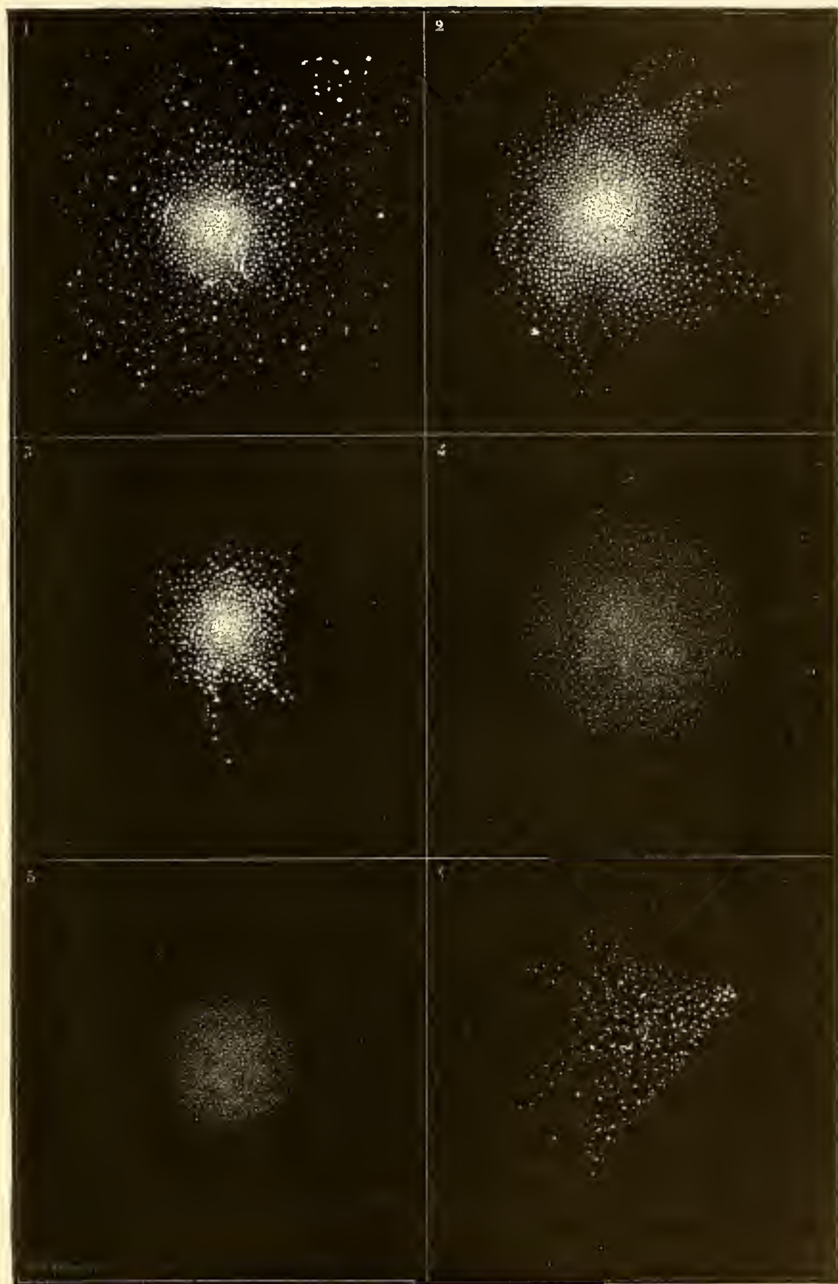
« Comment ces systèmes isolés, dit Humboldt (*Cosmos*, III, 153), peuvent-ils se maintenir? Comment les soleils qui fourmillent à l'intérieur de ces mondes peuvent-ils accomplir leurs

révolutions librement et sans chocs? » Ces questions qui se posent pour la plupart des nébuleuses, sont les plus difficiles de tous les problèmes de mécanique céleste. Mais il ne faut pas oublier que ces agrégations stellaires sont situées à des distances si grandes, que les corps dont elles sont formées et qui nous semblent très-rapprochés les uns des autres, ont entre eux des intervalles peut-être aussi considérables que la distance du Soleil à l'étoile la plus voisine. Leurs mouvements s'effectuent donc sans doute en toute liberté, dans des espaces aussi vastes que le nécessite l'équilibre général, et avec une lenteur relative proportionnée aux dimensions des orbites.

Le nombre des étoiles que renferment les amas de forme globulaire est souvent prodigieux. Nous avons vu que l'amas de la Croix du Sud (pl. XXXIV), si curieux par les couleurs variées de ses étoiles composantes, n'en contient guère que cent dix. Mais Herschel a calculé que plusieurs amas ne renferment pas moins de cinq mille étoiles[1], agglomérées dans un espace dont les dimensions apparentes sont à peine la dixième partie de la surface du disque lunaire.

Tel est l'amas situé entre les deux étoiles η et ζ d'Hercule (pl. XLIV, 2), découvert par Halley en 1714, et l'un des plus magnifiques du ciel boréal. Dans les belles nuits, cet amas, dont J. Herschel évalue le diamètre à 7′ ou 8′, est visible à l'œil nu, comme une tache lumineuse de forme ronde ; au télescope, il se résout en une multitude d'étoiles et conserve son apparence globulaire, mais frangée, sur les bords, de

1. « C'est en vain, dit-il, qu'on essayerait de compter les étoiles dans un de ces amas globulaires, les évaluât-on par centaines ; d'un calcul approximatif, basé sur les intervalles apparents qui existent entre elles sur les bords du groupe et sur le diamètre angulaire total, il résulte que quelques amas stellaires de cette espèce contiennent au moins cinq mille étoiles, condensées, serrées les unes contre les autres, dans un espace sphérique, dont le diamètre angulaire, mesurant au plus 8′ ou 10′, ne dépasse point par conséquence le dixième de la surface que couvre la Lune. » (*Outlines of astronomy*, 865.)



AMAS STELLAIRES

D'après les dessins et observations de sir J. Herschel.

1. Amas du Serpent (5 Messier, 1916 J. H.). — 2. Amas d'Hercule (13 M., 1968 H.).
3. Amas du Capricorne (30 M., 2128 H.). — 4. Amas du Verseau (2 M., 2125 H.).
5. Amas du Serpent (1929 H.). — 6. Amas des Gémeaux (VI 2 W. H., 415 H.).

plusieurs files d'étoiles qui divergent toutes d'un même côté.

L'amas connu sous le nom de ω du Centaure (fig. 301) est aussi visible à l'œil nu, et paraît brillant comme une étoile de quatrième à cinquième grandeur; son diamètre n'est pas moindre de 20′ : il embrasse donc environ la onzième partie d'un degré carré. « Ce splendide amas globulaire, dit J. Herschel, est sans comparaison le plus riche et le plus grand de tout le ciel. » Dans les instruments d'une grande puissance, il se résout en une multitude prodigieuse d'étoiles fortement



Fig. 301. Amas stellaire d'Oméga du Centaure (3504 H), d'après J. Herschel.

condensées vers le centre, les unes de douzième, les autres de treizième grandeur.

Le bel amas du Verseau, que le dessin de J. Herschel nous montre pareil à une fine poussière lumineuse (pl. XLIV, 4), examiné dans le puissant réflecteur de lord Rosse, apparaît (fig. 300) comme un magnifique amas globulaire entièrement décomposé en étoiles. « Comme la lumière totale de l'amas ne surpasse pas en éclat une étoile de sixième grandeur, il en résulte, dit J. Herschel, que quelques milliers d'étoiles de quinzième grandeur équivalent à une seule de la sixième. »

Un autre bel échantillon de ce genre est le splendide amas du Toucan, très-visible à l'œil nu dans le voisinage de la petite Nuée de Magellan, en une région du ciel austral entièrement vide d'étoiles. La condensation des étoiles au centre de cet amas est extrêmement prononcée ; elle se divise en trois gradations parfaitement distinctes, et la couleur rouge orangé de l'agglomération centrale contraste merveilleusement avec



Fig. 302. Amas du Toucan (2322 H), d'après J. Herschel.

la lumière blanche des enveloppes concentriques. Une étoile double se projette sur l'amas, mais il est probable qu'elle n'a aucune connexion avec le groupe. Étoiles innombrables de douzième à quatorzième grandeur.

Les amas de forme sphérique sont ordinairement les plus riches en étoiles, et ceux dont la décomposition par les instruments semble la plus aisée. Néanmoins, parmi les autres, il en est dont la résolution, jusqu'alors impossible, a été obtenue par l'emploi des télescopes de la plus grande force op-

tique. Telle est la nébuleuse ovale d'Andromède, que nous allons trouver au nombre des masses en partie décomposées.

Voici quelques amas de formes bizarres (fig. 303), où tout indice de concentration a disparu. Le dessin qui représente l'amas des Gémeaux (pl. XLIV, 6) semble un intermédiaire entre ces groupes informes[1] et les puissantes agglomérations sphériques que nous avons passées en revue. Là encore, au sommet de l'espèce de pyramide que forme ce singulier amas,



Fig. 303. Amas de formes singulières, d'après J. Herschel. — 1. Du Scorpion (3641 H). 2. De l'Autel (3645 H).

les points lumineux se pressent comme vers une masse prépondérante. Dans les amas de la figure 303, on ne voit plus rien de pareil. Une forme bien singulière est celle de l'amas étoilé de la planche XLIV *bis*.

Avant de continuer notre description des nébuleuses, il n'est pas sans intérêt d'arrêter un instant notre attention sur

1. Le mot *informe* est peut-être ici incorrect. Et, en effet, l'amas n° 1 de la figure forme, dans sa partie centrale, un cercle, dont les étoiles semblent coupées suivant deux diamètres à angle droit par des espaces vides, et qui est enveloppé d'un anneau pareillement vide d'étoiles. L'amas n° 2 a l'apparence d'un triangle circonscrit à distance par les trois côtés d'un carré formé d'autant de files de points lumineux.

les amas de forme globulaire ou sphérique. Rappelons d'abord que, sur un nombre total de 637 amas que renferme le catalogue général des nébuleuses d'Herschel, 102 sont notés comme globulaires, et 30 de ceux-ci sont entièrement résolus; les 72 autres sont simplement résolubles.

De telles associations, formées le plus souvent de myriades d'étoiles, sont évidemment des systèmes, des groupes, dont les individus sont unis par un lien physique. En admettant comme une hypothèse hautement probable, que ce lien est celui des corps célestes de notre système, celui des composantes des étoiles doubles et multiples, c'est-à-dire la gravitation, on se demande naturellement quelles perturbations multipliées doivent subir les mouvements de tant de corps réunis, si rapprochés, que les collisions semblent devoir être inévitables. La forte condensation qu'on observe au centre de quelques amas, dénote en outre, ainsi que J. Herschel l'a fait remarquer, autre chose qu'une simple distribution uniforme d'étoiles équidistantes. Elle indique une tendance vers le centre, qui, à moins d'un mouvement rotatoire et de la force centrifuge résultant de ce mouvement, doit amener à la longue un affaissement progressif. Quelle idée doit-on donc se faire de l'état dynamique et de l'équilibre de pareils systèmes?

L'état de la science ne permet sans doute aucune réponse positive à cette question, aucune solution de ces problèmes si vastes. Mais il ne faut pas oublier qu'en les posant, nous embrassons par la pensée des phénomènes dont la durée doit être aussi prodigieuse que la distance des régions où ils se passent. Nous condensons en un moment ce qui exige sans doute des milliers de siècles pour s'accomplir, de la même manière que, grâce à la prodigieuse distance des amas, nous condensons dans notre vue, au foyer de nos instruments, d'incommensurables espaces.

Plaçons-nous par la pensée au centre d'un des amas stel-



AMAS STELLAIRES

1. Amas d'Hercule (M. 13), vu dans le grand télescope de Parsonstown, d'après un dessin de M. B. Stoney. — 2. Amas de la Licorne (390 H.). — 3. Portion de la Voie Lactée voisine de la queue du Scorpion, d'après J. Herschel.

laires où nous venons de voir, par milliers, fourmiller les soleils. Quel spectacle le système offrira-t-il à notre vue? Tout fait croire que ce spectacle ne sera pas moins éblouissant, ne sera pas moins grandiose que celui du ciel étoilé, tel qu'il apparaît de la Terre. Toutes ces étoiles si resserrées paraîtront dispersées dans les profondeurs de l'éther, comme celles que nous voyons à l'œil nu. Et, en effet, elles sont probablement aussi éloignées les unes des autres, que notre soleil l'est des étoiles des sept ou huit premières grandeurs. En calculant la distance des étoiles de la 20e grandeur, d'après la loi formulée par M. Struve, on trouve qu'elle n'est pas inférieure à 900 fois celle des étoiles de premier ordre, dès lors à 900 millions de fois le rayon de l'orbite terrestre. D'un amas stellaire aussi éloigné, la lumière met 14000 ans à venir jusqu'à la Terre, et c'est aussi par millions de rayons de notre orbite que se mesurent les dimensions diamétrales d'un pareil système, que nous voyons sous des dimensions angulaires de quelques minutes. En un mot, quand nous contemplons les milliers d'étoiles éparses autour de nous dans le firmament, nous pouvons nous croire au centre d'un système semblable à l'un des amas stellaires que nous venons de décrire; et c'est en effet l'opinion généralement adoptée par les astronomes qui ont étudié la structure de l'Univers visible. S'il en est ainsi, les collisions ne sont pas plus à craindre entre les individus d'un amas globulaire qu'entre les étoiles que nous voyons à l'œil nu, et qui sont séparées les unes des autres par de si énormes distances. Les forces attractives dont elles sont le siége s'exercent pour produire des mouvements continuels dans toutes les étoiles, des mouvements sans doute très-rapides, mais qui cependant sont pour nous des mouvements séculaires.

Quant aux amas de forme irrégulière, formés d'un plus petit nombre d'étoiles éparses, qui empêche de les considérer, ainsi que le faisait W. Herschel, comme des groupes dont l'état de condensation est moins avancé que celui des amas

sphériques, mais pouvant le devenir à la longue, si l'attraction de quelques masses centrales plus considérables, ou d'un groupe d'individus plus serrés, finit par devenir prépondérante?

§ 2. NÉBULEUSES STELLAIRES, PARTIELLEMENT RÉSOLUES OU RÉSOLUBLES.

En se laissant guider par l'analogie, il est difficile de ne pas ranger parmi les amas stellaires un grand nombre de



Fig. 304. Nébuleuses de forme régulière, circulaire ou ovale, d'après J. Herschel.

nébuleuses, dont le télescope n'a pu encore et ne pourra peut-être jamais séparer les composantes, mais qui offrent une ressemblance frappante avec les amas. Ce sont les nébuleuses

dont la forme régulière est circulaire ou ovale et dont la lumière est condensée vers le centre. Les trois premiers dessins de la figure 304 donnent, d'après sir J. Herschel, des échantillons de ces sortes de nébuleuses dont la forme arrondie a l'aspect des amas globulaires non résolus ; on en connaît un grand nombre de semblables. Dans quelques-unes, la condensation de lumière est graduelle de la circonférence au centre ; dans d'autres, l'éclat nébuleux ne va pas en croissant d'une manière continue, mais augmente par couches concentriques



Fig. 305. Nébuleuses de forme elliptique ou allongée, à condensation centrale.
1. Nébuleuse de Pégase (2139 H). — 2. *Id.* (2297 H).

analogues à celles que nous avons déjà signalées dans l'amas du Toucan. Cette dernière circonstance donne une ressemblance de plus, entre les amas globulaires décomposés en étoiles, et les nébuleuses de même forme non encore résolues. Mais ces apparences n'appartiennent pas seulement à des nébuleuses de forme circulaire. Il en est qui affectent une forme ovale plus ou moins prononcée, comme on peut le voir sur la figure 304. De la forme, d'abord parfaitement ronde, des trois premières, on peut passer par des gradations insensibles aux formes elliptiques les plus allongées, presque jusqu'à la ligne droite. Dans les unes et les autres, on remarque

vers le centre une condensation marquée de la lumière, qui indique une analogie de composition avec les amas stellaires de forme sphérique. Nous avons déjà vu un exemple de cette forme elliptique dans la fameuse nébuleuse d'Andromède.



Fig. 306. La nébuleuse elliptique d'Andromède, d'après le dessin de G. P. Bond.

Pour les premiers observateurs, c'était une nébuleuse sans étoiles[1]. « Sa forme, dit J. Herschel, telle qu'on la voit dans

1. Voici comment Simon Marius l'a décrite dans son *Mundus Jovialis:*
« Le 15 décembre de l'année 1612, je vis par le moyen de la lunette, une étoile fort extraordinaire par sa figure et telle que je n'ai rien trouvé de semblable dans tout le ciel. Elle est à la ceinture d'Andromède, tout proche de la troisième ou de la plus septentrionale, et on la découvre en cet endroit à la vue simple, comme un petit nuage. Lorsqu'on la regarde avec la lunette, on n'y voit point briller plusieurs petites étoiles, comme dans la nébuleuse du Cancer et dans toutes les autres nébuleuses, mais on y aperçoit seulement quelques légers rayons de lumière blanchâtre, et d'autant plus clairs

un télescope ordinaire, est un ovale assez allongé dont l'éclat croît d'abord par degrés insensibles, puis, à la fin, très-rapidement jusqu'au point central. Ce point, bien que beaucoup plus brillant que le reste, n'est certainement pas stellaire, mais, ainsi que le tout, une nébuleuse dans un état extrême de condensation. Quelques étoiles se projettent accidentellement sur la nébulosité ; mais avec un réflecteur de 18 pouces d'ouverture (46 centimètres), rien n'excite le soupçon qu'elle soit composée d'étoiles. » Or, en 1848, le regretté directeur de l'Observatoire de Cambridge (États-Unis), G. P. Bond, à l'aide de la fameuse lunette de 38 centimètres de cet établissement, a décomposé la nébuleuse jusque-là irréductible. Il a pu y compter jusqu'à 1500 étoiles ; et, bien que le noyau ait résisté à la décomposition, il ne paraît pas douteux que la nébuleuse d'Andromède tout entière soit un amas stellaire. On peut voir, par la comparaison des figures 299 et 306, quelle altération sa forme régulière et ovale bien connue subit, quand elle est vue dans un aussi puissant instrument. Outre la résolubilité en étoiles, qui est le fait capital des observations de Bond, il y a d'autres particularités intéressantes à signaler dans son dessin. Deux longues fissures sombres y séparent les masses nébuleuses de la partie centrale, et au lieu d'un point unique de condensation lumineuse au centre, on en remarque plusieurs situés excentriquement ou latéralement. Les étoiles vues par Bond n'ont pas été figurées dans le dessin, que nous reproduisons d'après son mémoire.

On voit donc que, parmi les amas stellaires, il se trouve aussi des nébuleuses, de forme très-allongée, mais caractérisées par une condensation lumineuse. Néanmoins, comme le

qu'on approche davantage du centre. Ce centre n'est lui-même marqué que par une foible clarté sur un diamètre de près d'un quart de degré. Elle m'a paru avoir tout à fait l'apparence de la flamme d'une chandelle qu'on verroit dans la nuit, à travers de la corne transparente. »

(Cité par Mairan dans son *Traité physique de l'aurore boréale.*

fait remarquer sir J. Herschel, la plupart des nébuleuses de forme elliptique sont résolues avec plus de difficulté que les nébuleuses de forme globulaire. Est-ce, comme le même astronome le suggère, l'indice d'une constitution dynamique ou physique particulière? La forme réelle de tels amas est peut-être celle d'ellipsoïdes plus ou moins aplatis, qui se montrent à nous plus ou moins obliquement.

Parmi les nébuleuses de forme circulaire, il en est qui ne présentaient aucune apparence de condensation et cependant ont été partiellement résolues. Ce sont les *nébuleuses planétaires*. W. Herschel donnait ce nom à des disques uniformé-



Fig. 307. Nébuleuses planétaires, d'après J. Herschel. — 1. Des Poissons (838 II). 2. De la Grande-Ourse (112 II). — 3 D'Andromède (2241 II).

ment lumineux ayant l'apparence d'un corps sphérique, faiblement éclairé par une lumière étrangère. On peut voir, dans la figure 307, un certain nombre de ces nébuleuses de forme circulaire. Ce qui les différencie des amas globulaires ou nébuleuses sphériques, c'est l'égalité d'éclat de toute la surface, ou du moins l'absence de toute condensation lumineuse au centre, de toute dégradation de lumière du centre à la périphérie. Ce n'est que sur les bords mêmes du disque nébuleux, qu'on aperçoit une légère diminution dans l'intensité dont nous parlons. On en avait conclu que ce ne sont point des amas d'étoiles de forme sphérique ou ellipsoïdale, puisque, comme nous l'avons vu, même dans la supposition d'une égale distribution dans l'espace des composantes du groupe, la perspective

seule donnerait une condensation apparente vers le centre de l'image. Sont-ce de véritables amas stellaires de forme aplatie, et qui se présentent à notre rayon visuel perpendiculairement à leur face circulaire? Ou encore, comme le dit J. Herschel, les étoiles de ces nébuleuses sont-elles rangées en forme d'écaille sphérique creuse; forment-elles un disque très-aplati vu de face? Cela semble peu probable. Et, en effet, l'emploi de télescopes plus puissants a parfois modifié singulièrement l'aspect des nébuleuses dites planétaires, au point de ne plus laisser place aux conjectures

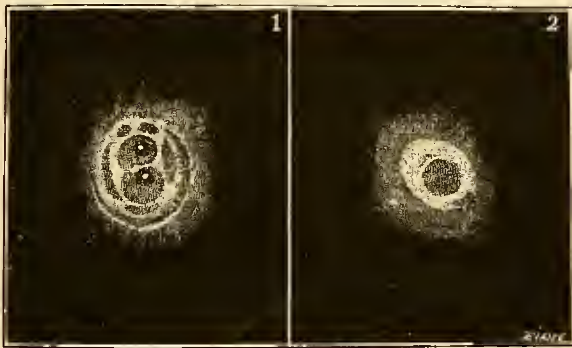


Fig. 308. Nébuleuses planétaires, d'après lord Rosse. — 1. De la Grande-Ourse. 2. D'Andromède.

qu'avait fait naître l'uniformité de leur éclat. Ainsi la nébuleuse planétaire de la Grande-Ourse, dont la lumière est si uniformément répartie dans le dessin de J. Herschel (fig. 307, 2), a été aperçue sous un tout autre aspect dans le grand télescope de lord Rosse. Le disque s'est changé en une double couronne lumineuse enveloppée d'une bordure frangée; au centre de la nébulosité apparaissent deux points qui ont toute l'apparence d'étoiles (fig. 308). Un autre exemple de ces changements nous est fourni par la nébuleuse planétaire voisine de $\varkappa$ d'Andromède, qui, parfaitement ronde dans le dessin d'Herschel (fig. 307, 3), apparaît sous la forme d'un anneau lumineux dans celui de lord Rosse (fig. 308, 2). Cet anneau,

constellé de points brillants probablement stellaires, est enveloppé d'un anneau plus faible entièrement nébuleux.

§ 3. NÉBULEUSES ANNULAIRES. ÉTOILES NÉBULEUSES.

Parmi les nébuleuses de forme ronde ou ovale, il en est un très-petit nombre qui offrent une structure toute particulière



Fig. 309. Nébuleuses annulaires. — 1. De la Lyre, d'après J. Herschel (57 M, 2023 H). — 2. De la Lyre, d'après lord Rosse. — 3. Du Cygne (2072 H). — 4. D'Ophiucus (2686 H). — 5. Du Scorpion (3680 H). — 6. Nébuleuse annulaire voisine de γ d'Andromède (218 H).

et fort curieuse, dont nous venons de voir à l'instant un exemple dans la nébuleuse planétaire d'Andromède. Je veux parler des nébuleuses annulaires ou perforées. L'une d'elles, fort intéressante, est située dans la constellation de la Lyre, non loin de la brillante Wéga, entre les deux étoiles β et γ du même astérisme. Un anneau nébuleux, de forme ovale, entoure un espace plus sombre, dont la pâle lueur, uniformément répartie, ressemble à une « gaze légère » étendue sur l'anneau[1]. Telle est l'apparence qu'a présentée d'abord cet

1. Un dessin de Secchi représente la nébuleuse perforée de la Lyre

objet singulier (fig. 309, 1). Depuis, le télescope de lord Rosse a distingué une série de points lumineux sur les bords intérieur et extérieur de l'anneau; sont-ce des étoiles? Des lignes parallèles remplissent l'ouverture, et les bords extérieurs sont constellés de franges (fig. 309, 2).

Nous reproduisons ici, d'après les dessins de J. Herschel, deux autres nébuleuses annulaires, l'une ovale, l'autre ronde. La première (fig. 309, 3), qui a beaucoup d'analogie avec la nébuleuse de la Lyre, est située entre les constellations du Cygne et du Renard; la seconde (fig. 309, 4) est dans Ophiucus.

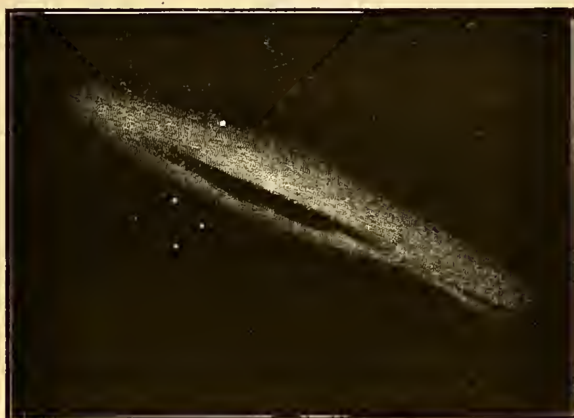


Fig. 310. Nébuleuse annulaire elliptique, au nord de η Pégase, d'après M. Mitchell.

La forme ovale de l'anneau est déjà prononcée dans la nébuleuse portant le n° 5, qui présente en outre une singularité que nous retrouverons bientôt : deux étoiles se trouvent situées sur l'anneau, aux extrémités de son plus petit diamètre

comme une fine poussière de points lumineux; l'anneau, bien terminé aux extrémités du petit axe, se fond au contraire aux extrémités du grand axe en deux nappes, dont la faible lumière rappelle précisément la lueur de la partie centrale. Dans le même dessin, on aperçoit un peu au nord du centre, une très-petite étoile. MM. d'Arrest, Lassell, Winloch et Trouvelot, et, en dernier lieu, M. Holden, ont étudié et dessiné cette nébuleuse intéressante. Les mesures de M. Holden donnent au grand axe 77″.3 et au petit axe 58″. Ces dimensions sont relatives aux contours les plus lumineux.

intérieur. Mais, dans une nébuleuse annulaire voisine de la belle étoile triple γ d'Andromède (fig. 309, 6), l'anneau est excessivement allongé (son grand axe mesure plus de 10′), et deux étoiles y sont aussi symétriquement placées ; seulement, cette fois, c'est à l'extrémité du plus grand diamètre intérieur de l'ellipse. « On ne peut guère douter, dit J. Herschel, que ce soit là un anneau mince de forme plane, d'énormes dimensions, et vu obliquement. » Dans le télescope de lord Rosse,

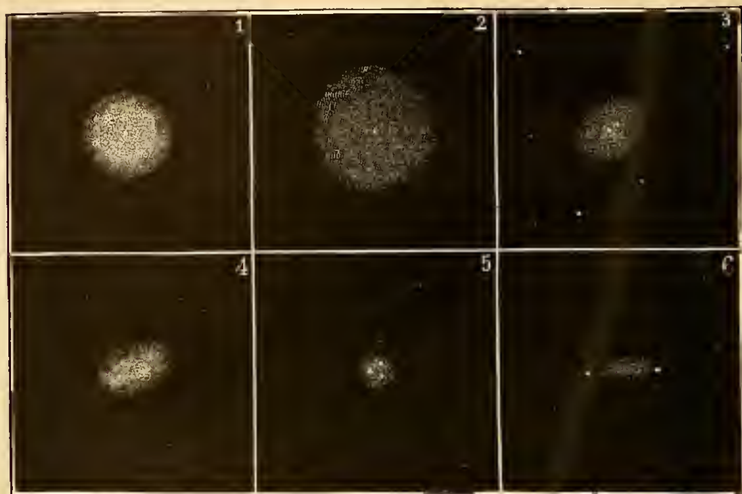
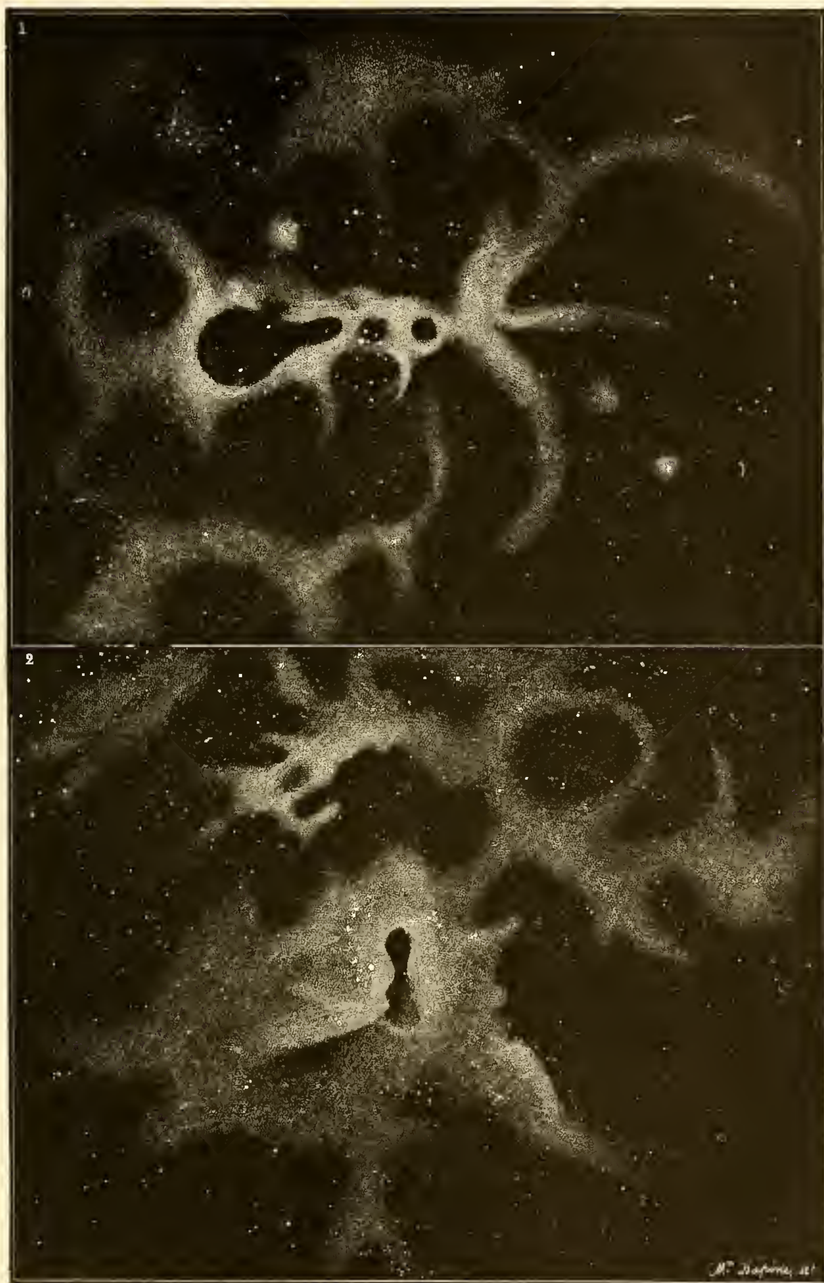


Fig. 311. Étoiles nébuleuses, d'après J. Herschel. — 1. Du Cygne (2051 H). — 2. De Persée (311 H). — 3. Du Centaure (3548 H). — 4. Du Sagittaire (2002 H). — 5. Du Cocher (355 H). — 6. De l'Hydre (536 H).

on y a distingué 6 étoiles. Voici enfin (fig. 310) une belle nébuleuse de forme elliptique très-allongée, où l'on remarque, dans la direction du grand axe, un vide sombre qui donne à l'ensemble la forme annulaire. Une forte condensation avec un noyau stellaire se voit au centre. La nébuleuse de la Lyre est la seule dont l'intérieur soit lui-même nébuleux ; dans les autres, la partie vide de l'anneau est d'un noir très-foncé.

Terminons le tableau, si merveilleusement riche en formes variées, des nébuleuses régulières, par la mention de celles



NÉBULEUSES DE LA DORADE ET D'ÊTA DU NAVIRE

D'après les dessins de sir J. Herschel

1. Nébuleuse de la Dorade. — 2. Nébuleuse entourant l'étoile Êta du navire.

qui ont reçu le nom d'*étoiles nébuleuses*. Ce ne sont autre chose que des nébulosités, tantôt circulaires, tantôt ovales, tantôt annulaires, mais toujours régulières, dans l'intérieur desquelles apparaissent un ou plusieurs points lumineux, sans doute des étoiles, se détachant distinctement de la nébulosité, et d'ailleurs symétriquement placés. Si la nébuleuse est circulaire, l'étoile occupe le centre ; dans le cas d'une forme elliptique, deux étoiles sont comme aux deux foyers de la courbe. On en peut voir une (fig. 311, 5), où trois étoiles sont régulièrement disposées aux sommets d'un triangle équilatéral, tandis qu'une autre nébuleuse très-allongée a deux étoiles placées extérieurement aux deux bouts du plus grand diamètre. Là, comme dans les nébuleuses planétaires, des télescopes d'une très-grande puissance nous font voir, au lieu d'un disque faiblement mais également éclairé, des formes bien plus irrégulières, et où la lumière se distribue d'une façon beaucoup plus inégale. Telles sont les étoiles nébuleuses représentées dans la figure 312, d'après les dessins originaux de lord Rosse.

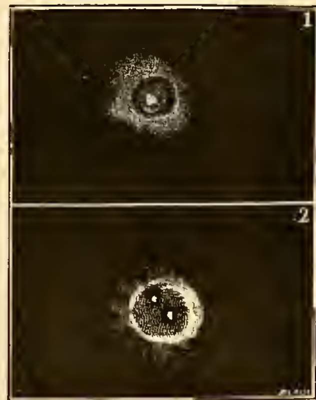


Fig. 312. Étoiles nébuleuses, d'après lord Rosse. — 1. Des Gémeaux. — 2. Du Navire.

On s'est aussi demandé s'il ne faut pas voir, dans les étoiles nébuleuses, des soleils enveloppés d'une atmosphère de dimension considérable, rendue visible à ces énormes distances par l'illumination des foyers stellaires. Cette opinion n'est certes pas dénuée de vraisemblance, bien qu'on puisse aussi, ce nous semble, considérer les étoiles nébuleuses comme des amas d'une multitude de très-petites étoiles, ayant à leur centre un soleil simple, double ou même multiple, dont l'éclat prépondérant suffirait à expliquer sa visibilité particulière.

La régularité dans les formes d'un grand nombre de nébuleuses n'est sans doute qu'apparente. Elle disparaît en partie, quand on les examine avec des instruments très-puissants,



Fig. 313. Nébuleuses de forme conique ou cométaire. — 1. De l'Éridan, d'après J. Herschel. 2. De la Licorne, d'après lord Rosse. — 3. De la Grande-Ourse, d'après J. Herschel.

c'est-à-dire lorsque, rapprochées ainsi de notre œil, elles lui laissent voir les détails de leur structure. Alors les grandes masses de lumière n'étant plus prépondérantes, la forme primi-



Fig. 314. Nébuleuse du Navire (3239 H), d'après J. Herschel.

tive perd de sa symétrie, comme on le peut voir dans les deux dessins qui représentent la nébuleuse annulaire de la Lyre.

Aussi, je le répète, la classification que nous avons adoptée est-elle tout arbitraire : elle nous permettra de ranger encore

parmi les nébuleuses régulières celles qui affectent la forme conique ou parabolique, assez semblable à celle de quelques comètes, ainsi que les nébuleuses de forme spiraloïde. Nous donnons ici (fig. 313) trois échantillons de ces nébuleuses, dont la forme a beaucoup d'analogie avec certains amas stellaires : par exemple, l'amas n° 6 de la planche XLIV présente la même disposition en éventail, la même concentration lumineuse au sommet.

Voici encore une nébuleuse (fig. 314) qui se rapproche par sa forme évasée des nébuleuses cométaires, mais qui semble donner en même temps, par un contournement singulier, le premier élément de la nébuleuse spirale. Elle a une grande analogie de forme avec l'amas de la planche XLIV *bis*, n° 3.

§ 4. LES NÉBULEUSES SPIRALES.

Dans toutes les nébuleuses que nous venons d'examiner, sauf cette dernière, la régularité des formes se manifeste par une symétrie telle, que chaque objet se trouve partagé en deux parties égales par un axe de figure. Mais il importe d'insister ur ce point, que la régularité disparaît souvent, quand un grossissement supérieur des instruments d'optique vient à montrer avec plus de netteté les diverses parties de la nébuleuse. On est tout étonné de la voir alors se transformer pour l'œil de la façon la plus complète. Nulle part ce changement de forme qui n'a, on le comprend, rien de réel, ne s'est manifesté d'une manière aussi brillante que dans la nébuleuse des Chiens de chasse. Qu'on jette les yeux sur la figure suivante (fig. 315) :

On y verra, au centre d'un anneau dédoublé sur la moitié de son contour, une nébuleuse globulaire très-brillante, accompagnée d'une petite nébulosité de forme ronde située en dehors de l'anneau et à une certaine distance. C'est sous

cette forme qu'elle a été vue en premier lieu et dessinée par J. Herschel[1].

Plus tard, observée à l'aide du magnifique télescope de lord Rosse, la même nébuleuse s'est présentée sous une forme d'une étrangeté merveilleuse (fig. 316). Des spires brillantes, inégalement lumineuses et parsemées d'une multitude d'étoiles, partent du centre de la nébulosité, s'enveloppent les unes les autres en divergeant de plus en plus, et finissent par se perdre dans une direction commune. Les filaments extérieurs de cette prodigieuse spirale d'étoiles vont rejoindre la petite nébuleuse globulaire extérieure, qui d'abord paraissait isolée de l'anneau.



Fig. 315. Nébuleuse des Chiens de chasse, d'après sir J. Herschel.

Enfin, d'après les observations plus récentes de J. Chacornac (*Comptes rendus* de 1862), cette dernière nébuleuse elle-même affecte la forme d'une spirale, dont les contours se rattachent avec les spires de la nébuleuse principale.

L'imagination reste confondue en présence d'un spectacle aussi grandiose. Dans l'hypothèse d'une résolubilité complète de la nébuleuse, l'esprit se perd à dénombrer les myriades de soleils dont les lumières individuelles agglomérées produisent

1. Elle est décrite sous le nº 51, dans le catalogue de Messier, comme « une nébuleuse sans étoiles » qu'on ne peut voir que difficilement avec une lunette ordinaire de 3 pieds et demi. « Elle est double, dit-il, ayant chacune un centre brillant, éloigné l'un de l'autre de 4′35″. Les deux atmosphères se touchent. » Comme le remarque sir J. Herschel, l'anneau nébuleux avait échappé à Messier.

ces franges nébuleuses d'intensités si diverses. A calculer les dimensions totales de l'immense système par les distances probables des atomes de cette poussière de mondes, on reste ef-



Fig. 316. La nébuleuse des Chiens de chasse vue dans le télescope de lord Rosso.

frayé de la profondeur des abîmes célestes où le regard humain est parvenu à plonger. Quelles forces singulières ont pu produire de semblables tourbillons de soleils[1]? La forme spi-

1. On doit à l'un de nos jeunes et savants compatriotes, M. Gaston Planté, une série de belles expériences où il cherche à mettre en évidence l'analogie

rale était-elle à l'origine celle des masses gazeuses dont la condensation a donné naissance à chacun des individus de cette association gigantesque, ou bien, est-ce à la longue, par le mouvement progressif des étoiles composantes, que peu à peu un tel arrangement s'est manifesté? Ce sont là autant de questions que l'esprit se pose, mais dont la solution demandera peut-être bien des siècles. Arrivera-t-on à reconnaître dans ces groupes des variations de forme, distinctes de celles qui ont pour cause la puissance des divers instruments, la différence de vue des observateurs? En un mot, pourra-t-on constater les mouvements des parties constituantes des nébuleuses? C'est ce que l'avenir dira.

La forme spiraloïde n'est pas particulière à la nébuleuse des Chiens de chasse. On peut voir qu'elle est tout aussi nettement prononcée dans la nébuleuse de la Vierge, que représente la figure 317. Les branches lumineuses de cette spirale, au nombre de quatre, sont nettement séparées par des intervalles noirs, et en outre divisées par des spires plus sombres qui indiquent des files d'étoiles ou de matière nébuleuse, moins condensées. Toutes d'ailleurs partent d'un nœud central où la lumière beaucoup plus vive indique une concentration prépondérante.

Le nombre des nébuleuses où la forme spiraloïde est plus

de certains phénomènes d'origine électro-magnétique, avec quelques phénomènes météorologiques ou cosmiques. Par exemple, il a pu reproduire toutes les apparences qu'offrent les taches solaires, les noyaux et pénombres, les stries dont ces pénombres sont sillonnées. C'est ici le cas de signaler celle de ces expériences, « dans laquelle un nuage de matière métallique, arrachée à une électrode par le flux électrique, prend, au sein d'un liquide, un mouvement giratoire *en spirale*, sous l'influence d'un aimant. Il suffit de jeter les yeux, ajoute-t-il, sur les figures qui représentent cette expérience pour y reconnaître la forme exacte des nébuleuses spirales décrites par lord Rosse.... En présence d'une analogie aussi frappante, n'est-on pas autorisé à penser que le noyau de ces nébuleuses peut être constitué par un véritable foyer d'électricité ; que leur forme en spirale doit être probablement déterminée par la présence de corps célestes fortement magnétiques placés dans le voisinage. » (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1875.)



NÉBULEUSE SPIRALE DU TRIANGLE

Vue dans le grand télescope de Parsonstown, d'après un dessin de M. Mitchell. — (H. 131).

ou moins accusée était d'abord assez restreint. Mais à mesure que le ciel est exploré par de plus puissants instruments, ce nombre s'accroît. Dans l'important mémoire publié par lord Rosse en 1861[1], nous avons noté quarante nébuleuses spirales, et une trentaine encore où cette forme est soupçonnée. Nous reproduisons ici plusieurs échantillons de ces singuliers



Fig. 317. Nébuleuse spirale de la Vierge, d'après lord Rosse.

objets (fig. 318 à 322); la première se trouve dans Céphée ; la seconde est aussi une nébuleuse du ciel boréal située sur les confins de la Grande-Ourse et du Bouvier. Le centre est comme une large nébuleuse globulaire, à condensation très-marquée, de laquelle partent des branches déliées en

1. *On the construction of specula of six feet aperture; and a selection from the observations of nebulæ made with them.*

forme de spires. En plusieurs points de ces branches, on



Fig. 318. Nébuleuse spirale de la constellation de Céphée (2084 H), d'après B. Stoney.



Fig. 319. Nébuleuse spirale de la Grande-Ourse (1744 H), d'après S. Hunter.

peut remarquer d'autres centres de condensation. J. Hers-

chel l'avait classée parmi les nébuleuses de forme arrondie, globulaire sans doute, parce que la nébulosité centrale était la seule que son télescope lui eût fait apercevoir. Un certain



Fig. 320. Nébuleuses spirales vues dans le grand télescope de Parsonstown.

nombre d'étoiles sont çà et là disséminées sur l'espace qu'elle occupe. Dans les deux nébuleuses de la figure 321, qui appartiennent la première au Lion, la seconde à Pégase, la

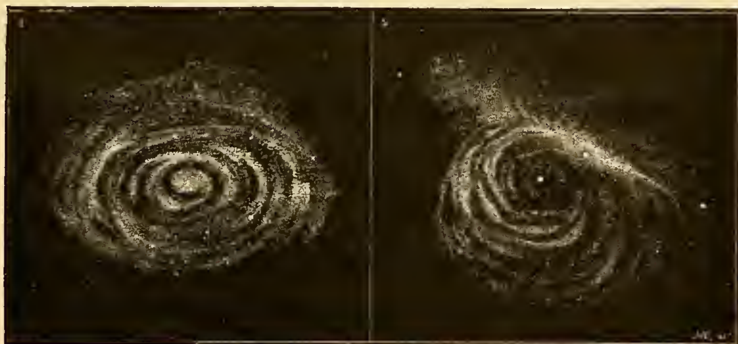


Fig. 321. Nébuleuses ovales, avec indices d'enveloppes spiraloïdes. — 1. Du Lion. 2. De Pégase. D'après lord Rosse.

forme spiraloïde est moins prononcée. Les spires se rapprochent de la forme elliptique et s'enveloppent les unes les autres.

Une autre nébuleuse de forme elliptique située dans la constellation du Lion, et que le dessin n° 7 (fig. 304) représente telle que la vit d'abord J. Herschel, est apparue sous la

forme suivante (fig. 322) dans le télescope de lord Rosse : le noyau central est composé d'enveloppes qui affectent une forme annulaire spirale, et les extrémités de l'ovale sont rayées de stries lumineuses rangées de chaque côté de l'axe, comme les arêtes dans la colonne vertébrale des poissons.

Avant de passer à la description des nébuleuses propre-



Fig. 322. Forme spiraloïde de la nébuleuse annulaire elliptique du Lion, d'après lord Rosse.

ment dites, rappelons que, sur 5076 objets compris dans le catalogue général de J. Herschel, 4042 sont rangés dans cette catégorie, ce qui donne un total de 1034 nébuleuses résolues en étoiles ou considérées comme susceptibles de résolution par les astronomes. Nous verrons plus loin comment ces deux espèces de nébuleuses sont répandues dans les diverses régions du ciel.

II

LES NÉBULEUSES IRRÉGULIÈRES.

§ 1. LES NÉBULEUSES IRRÉGULIÈRES.

Un grand nombre des nébuleuses que nous venons de décrire se distinguent par une régularité, une symétrie de forme qui, jointe à une condensation de la lumière en un point central, ou le long de courbes convergentes, indique, soit un lien unissant toutes les étoiles du groupe, si elles sont stellaires, soit, si elles sont physiquement nébuleuses, une tendance de la matière qui les compose à se réunir en un ou plusieurs centres prépondérants d'attraction. Outre ces agrégations régulières, les espaces célestes contiennent encore de grandes masses nébuleuses qui affectent les formes les plus diverses, les plus éloignées de toute apparence symétrique. Mais telle est la variété, telle est la richesse du monde sidéral, qu'on peut passer des nébuleuses de forme sphérique aux nébuleuses les plus accidentées et les plus irrégulières, par toutes les gradations imaginables. Nous avons eu déjà plusieurs cas de nébuleuses, régulières quand elles sont observées dans des lunettes d'une certaine puissance, et prenant un aspect tout différent dans des télescopes d'un pouvoir optique supérieur : la nébuleuse d'Andromède est un exemple frappant de telles modifications de forme.

Un autre exemple remarquable de ces transformations optiques, purement apparentes puisqu'elles ne dépendent que de la puissance des instruments, nous est fourni par une nébuleuse située dans la constellation boréale du Renard. J. Herschel, à qui l'on doit le premier dessin de cette nébuleuse (fig. 323), lui donna le surnom de *Dumb-bell*, à cause de sa ressemblance avec un instrument de gymnastique (*haltère*) usité en Angleterre, lequel a la forme d'un battant de cloche. Deux masses lumineuses symétriquement placées et reliées ensemble par un col assez court, le tout entouré d'une légère enveloppe nébuleuse de forme ovale, lui donnaient une apparence de régularité très-marquée. Cet aspect se modifia dans le télescope de trois pieds d'ouverture de lord Rosse (fig. 325), et les masses nébuleuses y montrèrent une tendance prononcée à la résolution stellaire. Plus tard, dans le télescope de six pieds, les étoiles apparurent nombreuses, mais se détachant encore sur un fond nébuleux. L'aspect général reprit sa symétrie primitive, moins régulière, mais néanmoins frappante encore. La figure 324 est la reproduction d'un dessin de la même nébuleuse, que nous devons à l'obligeance de M. Lassell.



Fig. 323. Dumb-bell ou nébuleuse de la constellation du Renard, d'après J. Herschel.

Les nébuleuses irrégulières se présentent parfois sous des formes véritablement bizarres. Tantôt ce sont de longues traînées vaporeuses, qui, çà et là, détachent leurs rameaux; tantôt ces nuées se contournent et prennent les aspects les plus fantastiques. Telle est la nébuleuse de l'Écu de Sobieski. Une partie elliptique terminée par deux appendices dont l'un est

presque rectiligne lui donne la forme de la lettre grecque majuscule Oméga (Ω). Au milieu de l'un des coudes (fig. 326), on remarque deux centres lumineux pareils à des amas globulaires sphériques. Une forme plus bizarre encore est celle de la nébuleuse du Taureau, qui, dans les instruments d'une faible puissance, paraît comme un ovale assez régulier. Dans le



Fig. 324. La nébuleuse du Renard, d'après un dessin de M. Lassell.

grand télescope de lord Rosse, elle se présente (fig. 327) comme une gigantesque écrevisse dont les antennes et les pattes sont figurées par de longues files d'étoiles.

Au milieu de l'un des deux nuages magellaniques, qui sont l'un des plus beaux ornements du ciel austral, et que nous décrirons plus loin avec quelques détails, se trouve une nébuleuse dont la forme complexe peut servir de transition pour

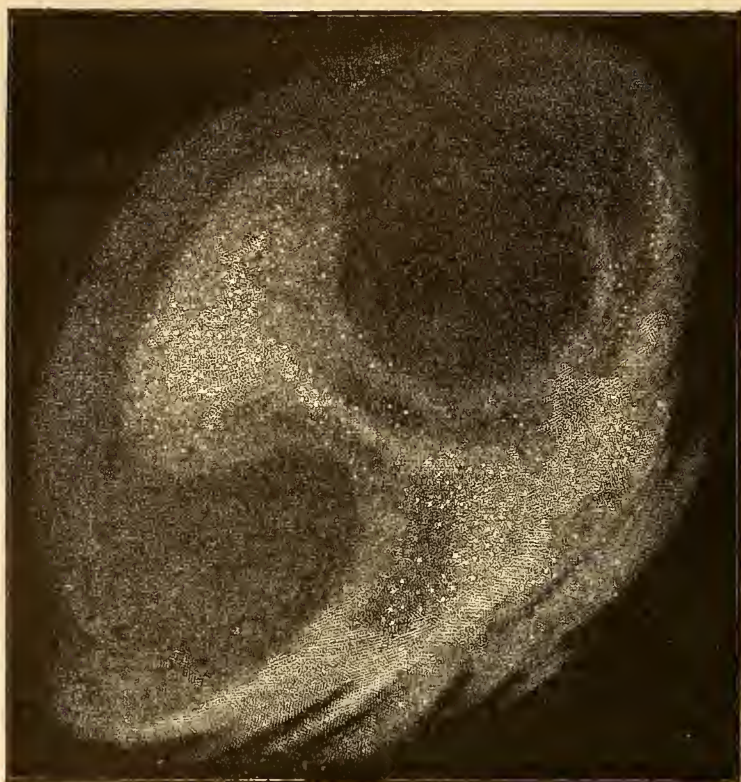


Fig. 325. La nébuleuse du Renard, vue dans le télescope de lord Rosse.



Fig. 326. Nébuleuse de l'Écu de Sobieski (M 17), d'après J. Herschel.

passer aux grandes nébuleuses irrégulières. C'est la nébuleuse de la Dorade (pl. XLX). La partie centrale composée de trois masses annulaires brillantes, les deux plus petites circulaires, la plus grande en forme de poire, est environnée d'ap-



Fig. 327. Nébuleuse du Taureau (*Crab Nebula*), d'après lord Rosse.

pendices dont la lueur beaucoup plus pâle est parsemée d'un grand nombre de petites étoiles.

§ 2. LES NÉBULEUSES D'ORION ET DU NAVIRE.

Les nébuleuses qui nous restent à décrire, se distinguent de toutes celles que nous avons jusqu'ici passées en revue, par l'irrégularité de leur forme aussi bien que par la gran-

deur de leurs dimensions. Semblables à des nuages tourmentés et déchiquetés par la tempête, les masses informes qui les composent embrassent sur le ciel des espaces supérieurs à la surface du disque lunaire et atteignent jusqu'à un degré carré. Un autre caractère commun à ces grandes nébulosités irrégulières, c'est leur situation dans la Voie Lactée, ou à peu de distance des bords de la zone, dont on pourrait croire que ce sont des rameaux.

Décrivons les deux nébuleuses de ce genre les plus intéressantes. Elles appartiennent toutes deux à l'hémisphère austral,

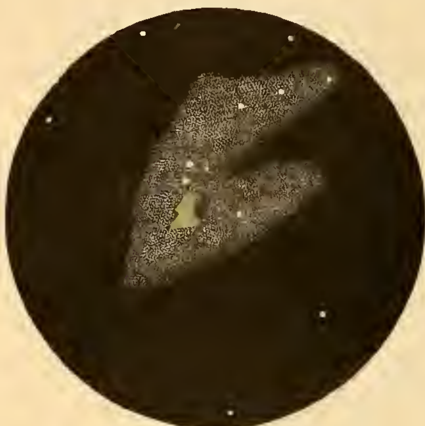


Fig. 328. Nébuleuse de l'Épée d'Orion, d'après le dessin d'Huygens. 1656.

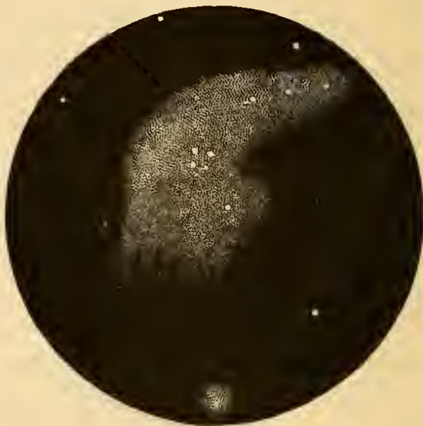


Fig. 329. Nébuleuse d'Orion, d'après le dessin de Mairan. 1750.

l'une à la constellation d'Orion, l'autre à celle du Navire; mais la première est peu distante de l'Équateur, et sa situation en a rendu l'étude facile aux astronomes des observatoires d'Europe et d'Amérique[1]. Elle occupe en effet, à peu de chose près, le milieu du grand quadrilatère dont Rigel et Betelgeuse forment deux angles opposés, et elle entoure la

1. Les étoiles du grand quadrilatère d'Orion passent au méridien vers minuit, du 10 au 20 décembre, à une hauteur moyenne de 40° pour la latitude de Paris. De la fin de septembre à mars, on peut donc les observer dans la même position, soit après, soit avant minuit.

belle étoile septuple θ, dont il a été question dans le chapitre consacré aux étoiles multiples.

La nébuleuse de l'Épée d'Orion, découverte par Huygens en 1656 (on prétend que Cysatus la vit dès 1619), a été, depuis deux siècles, l'objet de l'étude approfondie des astronomes; mais, jusqu'au milieu du siècle dernier, l'imperfection des télescopes n'avait permis d'en découvrir qu'une assez faible partie, la plus brillante, la plus condensée, à laquelle on a donné depuis le nom de *région d'Huygens*. Les figures 328 et 329 qui sont des *fac-simile* des dessins donnés, l'un par Huygens, l'autre près d'un siècle plus tard, par Mairan, indiquent assez, si on les compare avec le dessin de Bond (pl. XLVI), quelle faible idée l'on pouvait se faire alors de la grande nébuleuse. Le dessin de Messier de 1771 (fig. 330) est déjà plus complet. La région d'Huygens y est représentée avec plus d'exactitude dans sa forme et dans son éclat. En outre, d'autres masses nébuleuses, de nuances plus faibles, en accroissent l'étendue du côté occidental; un rameau se prolonge vers la partie australe, et les étoiles y sont plus nombreuses. Huygens ne marquait que 12 étoiles, dont 6 seulement se projetaient sur la nébulosité ; Mairan en ajouta une treizième, la quatrième des composantes de θ, qu'Huygens n'avait pas indiquée et sans doute pas vue, et dont on attribue la découverte à D. Cassini[1]. Dans le dessin de Messier, parmi les 31 étoiles figurées, 22 appartiennent à la nébuleuse, dont l'étendue, dix fois plus grande environ que celle d'Huygens et de Mairan, mesure près d'un douzième de degré carré.

Les observations modernes, faites avec des instruments plus

1. Trois autres étoiles, nous l'avons vu, ont été découvertes depuis, et ont fait de θ un système septuple. La 5e, de 13e grandeur, a été vue pour la première fois par Struve en 1826 ; la 6e, de 14e grandeur, par J. Herschel en 1832, et la 7e, intérieure au trapèze, est due à Lassell. De Vico, en 1839, et M. Porro, en 1857, affirmaient avoir vu d'autres très-petites étoiles à l'intérieur du trapèze, mais les observations ultérieures n'en ont pas confirmé l'existence.

puissants, avec infiniment plus de soin, de rigueur, de persévérance, ont montré toute la richesse de ce groupe à la fois nébuleux et stellaire, et fourni les éléments de comparaisons du plus haut intérêt. Lamont, sir J. Herschel, Liapounow et O. Struve, puis les deux Bond, ont accompagné leurs mémoires de cartes et de dessins, où l'on peut à loisir étudier l'étrange structure de ce magnifique objet. La planche XLVI est une

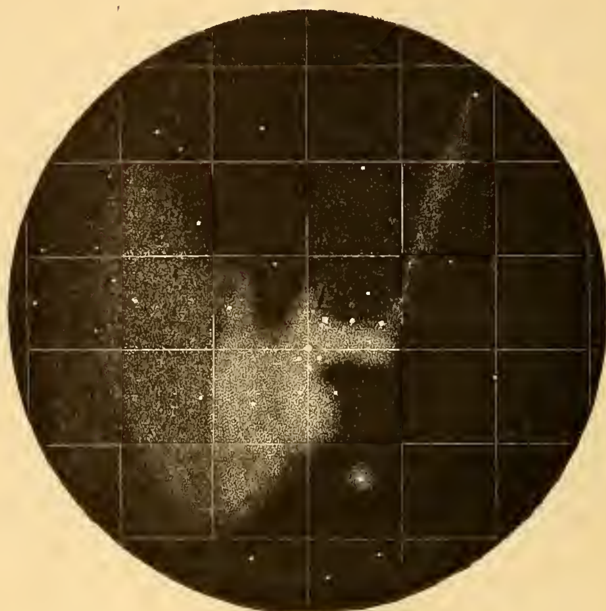


Fig. 330. Nébuleuse d'Orion, d'après un dessin de Messier fait en 1771.

reproduction réduite du dessin fait à Harvard Collége par G. P. Bond, d'après ses propres observations et les observations antérieures de W. C. Bond.

La partie la plus brillante de la nébuleuse, ou la région centrale d'Huygens, mérite, à divers titres, de fixer l'attention. Des contours presque rectilignes la circonscrivent de toutes parts, et en font un polygone rempli de masses globulaires, que divers astronomes s'accordent à considérer comme de véritables amas d'étoiles : Bond, Liapounow, J. Herschel



LA GRANDE NÉBULEUSE D'ORION

D'après un dessin de G. P. Bond.

s'accordent sur ce point, tandis qu'ils considèrent les autres régions de la nébuleuse comme n'offrant aucun indice de résolution. « Par sa forme, dit J. Herschel, la partie la plus brillante offre de la ressemblance avec la tête et la gueule béante d'un monstre, avec une sorte de trompe qui part du nez. » Les étoiles du trapèze, situées à l'intérieur de cette région, et se projetant sur un espace plus sombre [1], complètent la ressemblance en figurant l'œil du monstre. « L'aspect général, ajoute-t-il, de la portion la moins lumineuse est simplement nébuleux et irrésoluble, mais la région la plus brillante immédiatement contiguë au trapèze, et formant le front quadrangulaire de la tête, paraît dans le réflecteur de 45 centimètres (18 inches) divisée en masses dont la lumière pommelée et compacte, de structure granulaire, prouve qu'elles sont composées d'étoiles. Examinées avec le réflecteur de lord Rosse, ou à l'aide de la grande lunette achromatique de Cambridge, ces masses se montrent évidemment constituées par autant d'amas stellaires. »

De l'extrémité de la trompe, on voit s'échapper vers l'orient une longue et étroite nébulosité qui se recourbe ensuite en plusieurs branches du côté du sud ; et d'autres branches analogues divergent également du côté boréal et du côté occidental. Bond trouve dans ces rameaux nébuleux l'indice d'une structure spiraloïde ; mais si cette analogie existe entre les nébuleuses spirales et la nébuleuse d'Orion, il est bon de remarquer que les spires s'enroulent ici en deux sens opposés.

Selon J. Herschel, la grande nébuleuse d'Orion occupe sur le ciel un espace dont les dimensions apparentes ont la même étendue que le disque lunaire. Il semble porté à croire qu'elle se rattache à la Voie Lactée, qu'elle est peut-être le prolongement du rameau qui part de Persée, en se dirigeant vers

1. J. Herschel fait observer qu'à l'intérieur du trapèze il n'y a pas de nébulosité, « *no nebula exists.* » C'est aussi l'opinion de Liapounov. Dans le dessin de Bond, les 6 étoiles se projettent sur une faible nébulosité.

les Pléiades et Aldébaran. Le dessin de la Voie Lactée boréale, résultat des longues et minutieuses observations de M. Heis, semble témoigner du lien de la nébuleuse avec la Voie Lactée ; mais on y peut voir que c'est un rameau spécial de cette zone qui enveloppe presque tout Orion, et non la branche qui se détache de Persée.

La nébuleuse qui enveloppe η du Navire (pl. XLV) ne présente, comme celle d'Orion, aucune symétrie dans sa forme ni dans ses contours ; mais elle s'en distingue en ce que, jusqu'à présent, aucune de ses parties n'a donné d'indice de résolution en étoiles. « Vue dans un réflecteur de 45 centimètres, dit sir J. Herschel, cet étrange objet ne donne en aucune de ses parties de signe de résolubilité ; la partie la plus condensée adjacente au singulier vide de forme ovale qu'on voit au milieu de la figure, n'a pas cette apparence compacte, cette tendance à se diviser en nœuds brillants séparés par des intervalles obscurs, qui caractérise la nébuleuse d'Orion et indique sa résolubilité. » La nébuleuse d'η du Navire ne mesure pas moins d'un degré carré ; elle est située dans la Voie Lactée même, au sein d'une région si riche en étoiles, que J. Herschel en a compté plus de douze cents sur la surface occupée par la nébuleuse. Les étoiles, d'ailleurs, ne semblent pas faire partie de la nébulosité, sur le fond brillant de laquelle il est plus probable qu'elles se projettent simplement. Vers le centre de la nébuleuse, et tout près de l'étoile η, on remarque un vide de forme allongée et arrondie, une sorte de 8, qui laisse apercevoir le fond noir du ciel.

Nous reviendrons dans un chapitre prochain sur les deux grandes nébuleuses d'Orion et du Navire ; nous compléterons ce qu'on sait de leur constitution physique et des variations qu'on a constatées dans leur forme ou dans l'intensité de leur lumière.

III

LES GROUPES DE NÉBULEUSES.

§ 1. NÉBULEUSES DOUBLES ET MULTIPLES.

Nous avons vu plus haut les nébuleuses accompagnées de systèmes d'étoiles simples, doubles ou multiples, étoiles placées d'une manière tellement symétrique au sein de la nébulosité, qu'il semble impossible de douter de l'existence d'une connexion réelle entre les étoiles et les nébuleuses. Évidemment, ce sont là des groupes physiques d'une constitution toute spéciale. Souvent même, les étoiles qui accompagnent les nébuleuses, sans occuper une position particulière au sein des nébulosités, sont placées à l'extérieur comme de véritables satellites. Il est possible en effet que les énormes masses qui composent les amas, stellaires ou autres, aient une force attractive suffisante pour retenir ces petits corps en leur faisant décrire d'immenses orbites dans des périodes très-longues.

Il existe aussi des groupes de nébuleuses analogues aux groupes d'étoiles, c'est-à-dire formées de parties qui ont l'apparence d'une nébuleuse complète et dont les composantes très-rapprochées sont liées, sans aucun doute, autrement que par le hasard de la perspective. On retrouve dans ces intéressantes associations les mêmes variétés d'aspect et de forme

que dans les nébuleuses simples. Les unes paraissent formées de deux amas globulaires, dans lesquels la condensation centrale indique, non-seulement une figure sphérique, mais probablement aussi l'existence de véritables centres d'attraction on en peut voir des exemples dans la figure 331. Tantôt les composantes paraissent entièrement séparées et distinctes, tantôt elles semblent empiéter l'une sur l'autre, soit qu'il n'y ait là qu'une apparence optique, soit que la pénétration ait



Fig. 331. Nébuleuses doubles, d'après J. Herschel. — 1. De la Vierge (M 61, 1202 H). — 2. Des Chiens de chasse (1146 H). — 3. Du Verseau (2197 H). — 4. De la Vierge (1358 H). — 5. Des Chiens de chasse (1397 H). — 6. Du Grand-Nuage (2859 H).

une réalité physique. En un mot, comme le dit fort bien J. Herschel, « toutes les variétés des étoiles doubles, distances, positions, éclat relatif, ont leur contre-partie dans les nébuleuses doubles. »

Quelquefois, l'une des composantes est ronde ou globulaire, tandis que l'autre affecte une forme elliptique allongée. La nébuleuse représentée dans la figure 332 se compose de deux masses arrondies, terminées par des appendices rayonnants et reliés par une nébulosité commune : le tout enveloppé de

légers arcs lumineux semblables à des fragments d'un anneau nébuleux.

Le nombre des centres est souvent plus considérable ; il s'élève jusqu'à sept dans les nébuleuses multiples observées par J. Herschel, et dont nous reproduisons un curieux échantillon (fig. 331, 6). Le groupe dont il s'agit est un des nombreux amas qui forment la plus grande des deux nuées de Magellan. On pourrait déduire de cette circonstance, que le voisinage de ces sept nébuleuses est une apparence purement optique, si la nébulosité générale qui les enveloppe toutes n'indiquait une réelle dépendance[1]. Du reste, la connexion des composantes dans les nébuleuses multiples, si on les considère comme des amas stellaires, ne sera, sans doute, jamais démontrée avec l'évidence qui caractérise les systèmes des étoiles doubles. Dans ces derniers systèmes, en effet, on a pu étudier les mouvements de révolution de l'un des soleils autour de l'autre, parce que la distance où nous en sommes, quelque grande qu'elle soit, rend ces mouvements observables en un certain nombre d'années. Au contraire, les nébuleuses multiples semblent reléguées à de telles profondeurs dans l'étendue indéfinie des abîmes du ciel — ainsi que le montre leur



Fig. 332. Nébuleuse double, d'après lord Rosse.

1. Voici les raisons que donne sir J. Herschel à l'appui de cette connexion physique des nébuleuses doubles : « L'argument tiré de la rareté comparative des objets en proportion de l'étendue entière du ciel, si fort dans le cas des étoiles doubles, l'est infiniment plus dans celui des nébuleuses doubles. Des nébuleuses, par exemple, aussi grandes et aussi faibles, et aussi peu condensées vers le centre que celle de la figure (2152 H, nébuleuse double de la Chevelure de Bérénice), sont extrêmement rares, même séparées, de sorte que la probabilité que deux nébuleuses pareilles soient réunies par le hasard,

aspect nébuleux lui-même — que tout mouvement d'une des parties est resté jusqu'ici insensible (nous citerons cependant plus loin un exemple de déplacement relatif dans les composantes d'une nébuleuse double). Des milliers d'années, de siècles peut-être, seraient nécessaires pour que nous pussions être témoins des changements de position de l'ensemble. Nos télescopes auront beau multiplier leur puissance, la vue perfectionnée pénétrer plus intimement dans la structure de l'Univers, nous ne pouvons devancer le temps. Dans la vie des mondes, la durée de notre vie n'est qu'une seconde, comme notre système tout entier n'est lui-même qu'un point au sein de l'espace infini.

§ 2. LES NUÉES DE MAGELLAN.

Lorsqu'on jette les yeux sur les régions de la voûte céleste qui environnent le pôle austral, on ne peut s'empêcher d'être frappé du contraste que présente leur pauvreté stellaire avec la zone éclatante qui longe la Voie Lactée, d'Orion et du Navire au Centaure, en passant par la Croix du Sud. Une seule étoile de première grandeur, Achernar, d'ailleurs plus éloignée du pôle que les belles étoiles du Centaure et de la Croix, brille dans cette partie du ciel. Mais cette circonstance même rend plus saisissant encore l'aspect singulier de ces deux taches nébuleuses (voyez la planche XXXIX) qui semblent deux morceaux détachés de la grande zone galactique. Ces deux nébuleuses, inégales en grandeur et en éclat, mais faciles à voir à l'œil nu par une nuit pure et sans lune, sont situées, l'une, la

si voisines l'une de l'autre qu'elles mêlent leurs nébulosités, est extrêmement petite. Aussi sera-ce un sujet des plus intéressants des recherches futures, que de savoir si quelques traces de mouvement de révolution (indiqué par un changement progressif dans les angles de position rapportés au méridien) peuvent être découvertes dans ces associations de nébuleuses. (*Observations of nebulæ and Clusters of Stars.*)

plus grande et la plus brillante, entre le pôle et Canopus, dans la constellation de la Dorade; l'autre, la plus petite et la moins éclatante, ordinairement invisible pendant les pleines lunes, dans l'Hydre mâle, entre Achernar et le pôle. Toutes deux sont connues des astronomes et des navigateurs sous les noms de *Nuages du Cap*, ou encore de *Nuées de Magellan*. On dit, pour les distinguer : le Grand-Nuage (*Nubecula major*) et le Petit-Nuage (*Nubecula minor*). On peut voir dans les figures 333 et 334 la forme générale de ces deux nébuleuses vues à l'œil nu. Les nuées de Magellan se distinguent de toutes les nébuleuses que nous avons décrites jusqu'à présent, et par leurs grandes dimensions apparentes, et par leur composition intérieure. Ce dernier caractère les différencie pareillement de la plupart des branches et des rameaux de la Voie Lactée, avec laquelle d'ailleurs elles ne semblent reliées par aucun appendice de nébulosité. Le Grand-Nuage s'étend sur un espace qui n'embrasse pas moins de 12 degrés carrés; c'est deux cents fois environ la surface apparente du disque lunaire. Le Petit-Nuage occupe une étendue quatre fois moins grande que l'autre; selon Humboldt, il est environné « d'une sorte de désert » où brille, il est vrai, le magnifique amas stellaire du Toucan, dont il a été parlé plus haut. Si l'aspect extérieur de ces deux remarquables nébuleuses et leur situation dans une région céleste pauvre en étoiles, donnent au ciel austral une physionomie

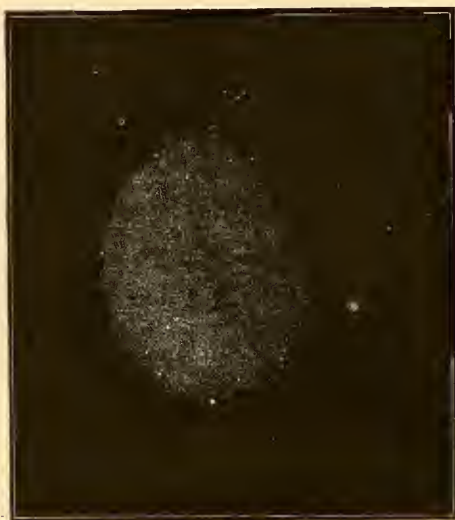


Fig. 333. Nuées de Magellan. Le Petit-Nuage (*Nubecula minor*), d'après J. Herschel.

toute particulière, leur structure intime en fait véritablement une des merveilles du ciel. Explorées à l'aide d'un puissant télescope par J. Herschel, pendant le séjour de cet illustre observateur au cap de Bonne-Espérance, elles se sont l'une et l'autre décomposées en objets multiples dont la figure 335, qui représente une portion (le 20ᵉ environ) du Grand-Nuage, peut donner une idée.

On y voit d'abord un grand nombre d'étoiles isolées, dont l'éclat varie entre la 5ᵉ et la 11ᵉ grandeur. Puis des amas stellaires, les uns de forme irrégulière, les autres — et c'est le plus grand nombre — affectant une forme globulaire, sphérique ou ovale. Enfin, des nébuleuses, les unes isolées, les autres groupées par deux, par trois, etc., la plupart arrondies et régulières. L'une d'elles, connue sous le nom de nébuleuse de la Dorade, déjà décrite plus haut et représentée dans la planche XLV, appartient au Grand-Nuage. « Cette nébuleuse (Humboldt, *Cosmos*) occupe à peine la cinq-centième partie de l'aire du nuage, et déjà sir J. Herschel a déterminé dans cet espace la position de 105 étoiles de 14ᵉ, de 15ᵉ et de 16ᵉ grandeur, projetées sur un fond nébuleux dont rien n'altère l'éclat uniforme, et qui a résisté aux plus puissants télescopes. » Les nébuleuses doubles et multiples y sont aussi beaucoup plus nombreuses que dans les zones du ciel les plus riches en objets de cette nature. Ainsi, je le répète, la constitution de ces singulières nébulo-



Fig. 334. Les Nuées de Magellan. — Le Grand-Nuage (*Nubecula major*), d'après J. Herschel.

PETIT CHIEN Procyon — GEMEAUX Pollux Castor — COCHER Chèvre — GIRAFE — PETITE OURSE Polaire



ORION — TAUREAU Hyades — PLÉIADES — PERSÉE — CASSIOPEE

LA VOIE LACTÉE

Dans l'hémisphère boréal, d'après le Dr E. Heis.

sités paraît notablement différente de celle de la Voie Lactée, dont elles se trouvent d'ailleurs assez éloignées. Elles se distinguent aussi des autres nébuleuses connues, et semblent comme des miniatures du ciel entier.

Un mot maintenant de la structure de chacune des deux nuées. Dans le Grand-Nuage, Herschel a compté 582 étoiles isolées, parmi lesquelles une seule est de 5e grandeur; six



Fig. 335. Les Nuées de Magellan. — Structure d'une portion du Grand-Nuage, d'après J. Herschel.

autres sont de l'ordre immédiatement inférieur et seraient sans doute visibles à l'œil nu, si leur lumière n'était effacée par la lueur générale. Puis viennent 284 nébuleuses et 66 amas d'étoiles formant autant de groupes distincts.

Dans le Petit-Nuage, les étoiles isolées sont proportionnellement plus nombreuses, puisqu'on en compte 200, parmi lesquelles 3 sont de 6e grandeur, tandis qu'il renferme seulement 32 nébuleuses et 6 amas stellaires.

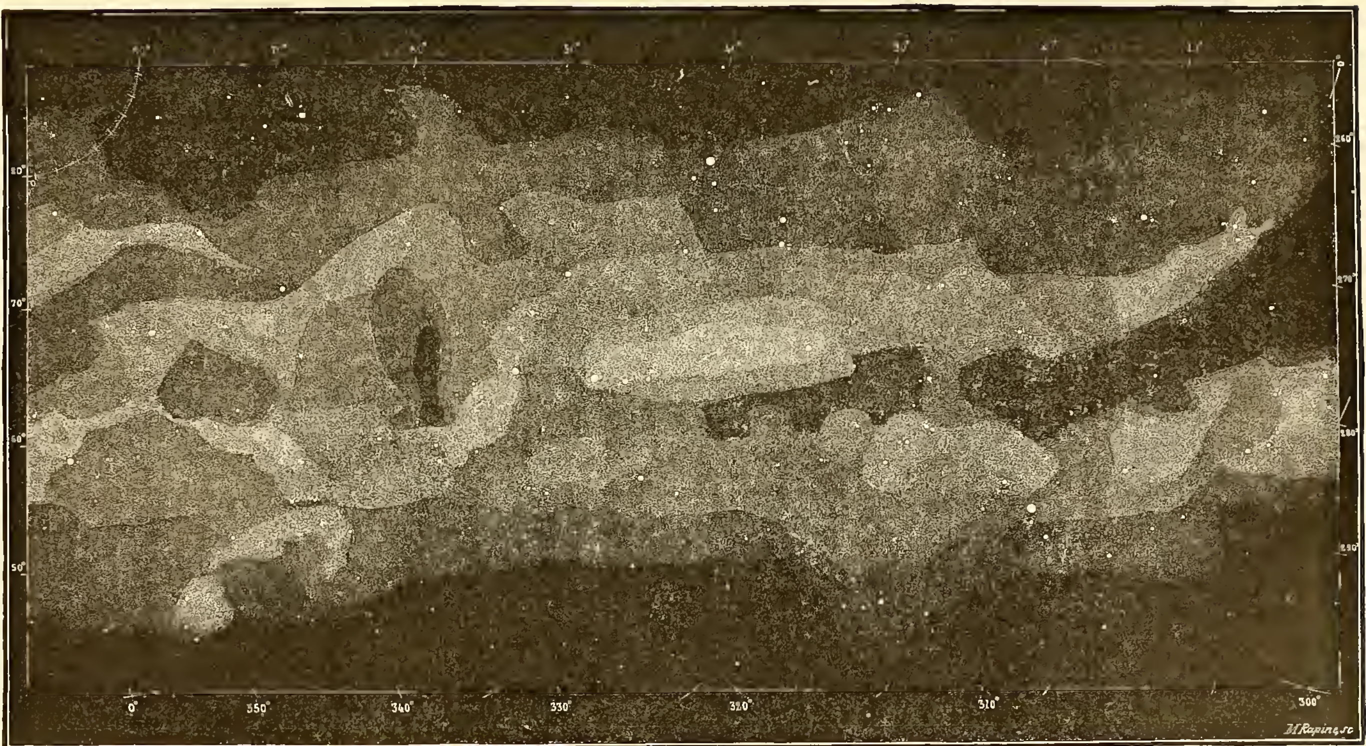
Ces immenses agrégations, dont les éléments sont eux-mêmes en grande partie des fourmilières de soleils, nous amènent à la plus grande, en apparence du moins, de toutes les nébuleuses que l'œil contemple dans les profondeurs du ciel, à la Voie Lactée.

§ 3. LA VOIE LACTÉE. — ASPECT GÉNÉRAL DE LA VOIE LACTÉE.

A l'exception des nuées de Magellan et de quelques rares amas stellaires, toutes les nébuleuses que nous avons jusqu'ici passées en revue sont invisibles à l'œil nu. L'extrême petitesse de leurs dimensions apparentes contribue à ce résultat, au moins autant que les distances prodigieuses où elles se trouvent du monde solaire, distances qui affaiblissent si considérablement l'éclat des étoiles composantes, ou la lumière des nébulosités diffuses dont elles sont formées.

Il n'en est pas ainsi de la Voie Lactée. La lumière de cette immense zone est assez éclatante, son étendue, qui embrasse en longueur une circonférence entière de la voûte étoilée, et sa largeur sont assez considérables, pour qu'on la distingue au premier coup d'œil, toutes les fois que le mouvement apparent du ciel l'amène au-dessus de l'horizon. Cette dernière circonstance se présente, il est vrai, toutes les nuits de l'année, et sous toutes les latitudes; mais la Voie Lactée se voit d'autant mieux qu'elle s'élève à une plus grande hauteur, et il est bien évident qu'il faut, pour la voir ainsi, choisir certaines époques de l'année ou certaines heures de la nuit.

L'apparence générale de la Voie Lactée est celle d'une longue traînée nébuleuse, qui suit à très-peu près la circonférence d'un grand cercle de la voûte céleste. De prime abord, on remarque qu'elle se divise en deux branches principales sur près de la moitié de sa longueur entière. Sa largeur est très-variable : tantôt elle se resserre au point de ne plus



LA VOIE LACTÉE

Dans l'hémisphère boréal, d'après le Dr E. Heis.

occuper que six à huit fois le diamètre lunaire; tantôt elle se répand sur une étendue quatre fois plus grande[1].

Avant de dire ce qu'on sait de la composition et de la structure de cette immense nébuleuse, attachons-nous à la décrire dans son ensemble, en signalant les principales constellations qu'elle traverse dans l'un et l'autre hémisphères. Nous nous aiderons pour cela des trois planches XLVII, XLVIII et XLIX, qui la montrent telle qu'on la voit quand le ciel est très-pur, avec les variations de forme et d'éclat que présentent ses ramifications diverses.

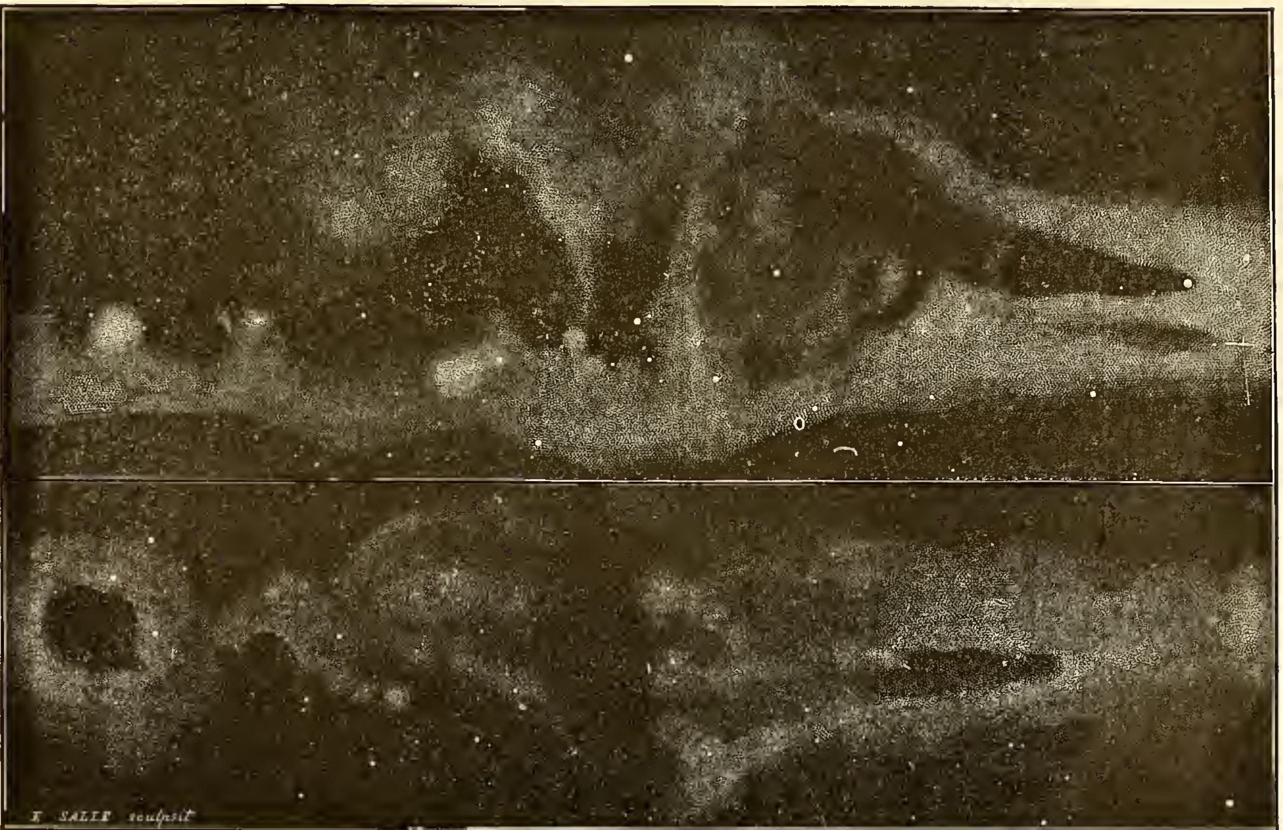
La moitié boréale de la Voie Lactée s'étend depuis l'Aigle et le Serpent jusqu'à la Licorne, à la hauteur et dans le voisinage du Baudrier d'Orion. Divisée en deux branches de l'équateur jusqu'au Cygne, elle longe Ataïr, et traverse, outre les premières constellations citées, la Flèche et le Renard. Près du Cygne, on aperçoit une place obscure, une sorte de trouée à travers laquelle le regard plonge dans les régions lointaines du ciel, par delà les limites de la zone. Un rameau se dirige vers la Petite-Ourse, dans Céphée, et c'est en cet endroit qu'elle approche le plus du pôle nord de la voûte céleste. Elle s'en éloigne ensuite, sous la forme d'une branche unique et étroite qui traverse Cassiopée, passe dans le Cocher, tout près de la Chèvre, longe la partie orientale des Gémeaux et du Petit-Chien et la partie septentrionale d'Orion. Avant d'arriver en ce point, on aperçoit un rameau qui part de Persée et s'avance jusqu'auprès des Pléiades, où il se perd. C'est dans l'Aigle et dans le Cygne, que la zone lactée boréale présente le plus d'intensité; dans Persée et près de la Licorne, qu'elle est la moins lumineuse.

1. Les six planches où nous avons représenté le ciel étoilé donnent aussi une idée de sa forme et de son aspect, pourvu qu'on n'oublie pas qu'elle n'apparaît, à l'œil nu, ni aussi éclatante, ni aussi nettement limitée, le dessinateur ayant dû, pour le but que nous nous proposions, exagérer ces deux éléments, la forme et l'éclat. Même remarque pour les planches XLVII à XLIX.

Suivons-la maintenant dans son trajet à travers l'hémisphère austral.

Après avoir traversé l'équateur et longé Sirius, elle entre dans le Navire, en augmentant progressivement d'éclat. Là, elle se partage en plusieurs rameaux qui s'étendent en éventail sur une grande largeur, et s'évanouissent tous à la fois, pour reparaître un peu plus loin dans la même constellation. Ces rameaux se réunissent dans le Centaure et la Croix du Sud, en un point où la Voie Lactée offre son minimum de largeur. C'est là que se trouve le fameux Sac-à-Charbon, trou obscur en forme de poire, environné de toutes parts par la zone nébuleuse, et où l'œil nu n'aperçoit qu'une seule étoile, bien qu'il y en ait un assez grand nombre de télescopiques. Tout près d'α du Centaure, la Voie Lactée se divise de nouveau en deux branches principales, avec nombreuses ramifications, et la bifurcation continue dans le Loup, l'Autel, le Scorpion, le Sagittaire, jusqu'au Serpent. Alors les deux branches, traversant de nouveau l'équateur, rejoignent la partie boréale de la Voie Lactée, au point même où notre description a commencé.

Dans cet immense parcours, qui embrasse, je l'ai dit, tout un grand cercle de la voûte céleste, la lueur de la nébuleuse est extrêmement variable d'éclat. On a vu que la partie la plus brillante de la Voie Lactée boréale est celle qui traverse l'Aigle et le Cygne. Dans l'hémisphère du Sud, la zone comprise entre le Navire et l'Autel est plus remarquable encore. Mais, comme le fait observer Humboldt, une circonstance accroît encore la magnificence de la Voie Lactée dans l'hémisphère austral, c'est le voisinage d'une longue zone d'étoiles très-brillantes, que nous avons déjà remarquée en passant en revue les constellations, zone qui part de Sirius, dans le Grand-Chien, pour traverser le Navire, et les belles étoiles de la Croix, du Centaure et du Scorpion. Aussi, selon un observateur anglais, le capitaine Jacob, une personne non



VOIE LACTÉE AUSTRALE

D'après le dessin de sir John Herschel

prévenue est avertie du lever au-dessus de l'horizon de cette partie du ciel, par l'illumination générale de l'atmosphère, illumination si vive, qu'il la compare à la lueur que répand la nouvelle Lune.

Quand on examine la Voie Lactée à l'aide des télescopes, la nébulosité se résout généralement en une multitude d'étoiles très-rapprochées les unes des autres, mais fort irrégulièrement condensées. Les amas stellaires de formes irrégulières y sont surtout très-nombreux : il n'en est pas de même des amas de forme globulaire, qui ne se trouvent guère que dans la partie la plus brillante de la zone australe. « Si quelques régions, dit Humboldt, présentent de grands espaces où la lumière est uniformément répartie, il vient, immédiatement après, d'autres régions où des espaces brillant du plus vif éclat alternent avec des espaces pauvres en étoiles et dessinent sur le ciel des réseaux irrégulièrement lumineux. On trouve même, jusque dans l'intérieur de la Voie Lactée, des espaces obscurs où il est impossible de découvrir une seule étoile, fût-elle de dix-huitième ou de vingtième grandeur. A l'aspect de ces régions absolument vides, on ne saurait se défendre de l'idée que le rayon visuel a pénétré réellement dans l'espace, en traversant l'épaisseur entière de la couche stellaire qui nous environne. » (Humboldt, *Cosmos*, p. 150.)

Dans un grand nombre de ses points, la zone nébuleuse a été complétement résolue, de sorte que les étoiles s'y projettent sur un fond noir, absolument dépourvu de toute nébulosité. Mais dans d'autres régions, derrière les étoiles, on aperçoit encore une lueur blanchâtre qui montre que dans ces directions la Voie Lactée est réellement impénétrable.

Nous examinerons, dans le Livre qui va suivre, quelle est la forme, quelle est l'étendue de la Voie Lactée, et dans quelle mesure les données actuelles de la science permettent de comprendre la structure de l'Univers visible.

IV

CONSTITUTION PHYSIQUE ET CHIMIQUE DES NÉBULEUSES.

§ 1. HYPOTHÈSE DE LA MATIÈRE NÉBULEUSE DIFFUSE.

Toutes les nébuleuses semées dans les profondeurs du ciel doivent-elles être considérées comme autant d'agglomérations d'étoiles, ne différant des amas globulaires que par la forme générale, le groupement des composantes? Ou bien doit-on penser que, dans le nombre de ces nuages célestes, il en est qui sont composés d'une matière diffuse, vaporeuse, ou du moins formés par l'accumulation de corpuscules brillants, d'une grande ténuité relative, et n'ayant d'ailleurs aucune analogie avec les véritables corps célestes, avec les soleils?

L'hypothèse d'une matière nébuleuse, douée d'une lumière propre et répandue par masses immenses au sein de l'étendue, a été proposée, dès l'origine, par les astronomes dont les instruments ne parvenaient point à décomposer ces sortes de nuages cosmiques. Les grandes nébuleuses surtout, à forme irrégulière et tourmentée, comme celle qui environne θ d'Orion, avaient beaucoup contribué à l'admission de cette hypothèse, que l'autorité de W. Herschel ne contribua pas peu à faire adopter. Les nébuleuses globulaires, successivement résolues, firent d'abord penser que les amas stellaires affec-

taient tous la forme arrondie, sphérique, avec condensation lumineuse au centre, et c'est ce qui explique pourquoi l'idée de nébulosité réelle fut principalement réservée aux nébuleuses irrégulières.

Cependant, les observations modernes, effectuées avec des instruments d'une puissance inusitée, vinrent peu à peu démontrer l'identité de composition d'un grand nombre de ces dernières nébuleuses, avec les amas stellaires. Des milliers de petites étoiles apparurent, là où l'on n'avait pu voir auparavant qu'une lueur phosphorescente, laiteuse, et, selon l'expression des astronomes, d'un aspect indéfinissable et caractéristique. Les observateurs disaient de la nébuleuse d'Orion « qu'elle ne fait naître aucune sensation d'étoiles, et qu'on n'y remarque point ces élancements stellaires, indices d'une décomposition probable ; » la nébuleuse d'Andromède semblait devoir être rangée dans la même catégorie ; or celle-ci a été récemment résolue, du moins en partie. Ainsi, l'hypothèse d'une matière diffuse et nébuleuse semblait reculer au fur et à mesure des progrès de l'observation.

Était-ce à dire qu'elle dût être tout à fait abandonnée ? L'existence d'une matière de ce genre n'avait rien d'incompatible avec ce qu'on sait de la constitution physique des corps célestes. Les comètes, avec leurs noyaux vaporeux qui manifestent divers degrés de condensation, avec leurs auréoles et leurs queues si diffuses, que les étoiles s'aperçoivent au travers, avec leurs faibles masses, prouvaient bien que cette existence serait possible et réelle. L'agglomération, de quelque nature qu'elle soit, qui produit la lueur zodiacale, venait encore à l'appui de l'hypothèse d'une matière nébuleuse. On n'avait néanmoins aucun témoignage positif de son existence, et les partisans de la résolubilité complète de toutes les nébuleuses se bornaient à arguer de la faiblesse relative des instruments d'optique et de ce fait d'observation, mentionné plus haut, que l'emploi de télescopes plus puissants étendait le

nombre des amas stellaires proprement dits, tout en accroissant le nombre des nébuleuses irréductibles.

La question en était là, quand plusieurs astronomes se mirent à étudier la lumière des nébuleuses et la constitution de leurs spectres. Ce nouvel examen trancha définitivement la difficulté pendante, en faisant voir que certaines nébuleuses ne peuvent être considérées comme des amas d'étoiles, mais comme des agglomérations d'une matière gazeuse, à l'état d'incandescence. Avant d'indiquer les résultats de ces recherches, mentionnons quelques faits qui se rattachent au même ordre d'idées, nous voulons parler de la différence de couleur et de la variabilité de certaines nébuleuses.

En décrivant, d'après J. Herschel, le plus beau des amas stellaires, l'amas du Toucan, nous avons vu que la partie centrale est colorée en rose, et enveloppée d'une bordure blanche concentrique. La nébuleuse ayant été entièrement résolue en étoiles, cette coloration appartient évidemment à chacune des composantes. C'est un fait qui n'a rien de surprenant, après ce que l'on a vu des étoiles colorées simples ou doubles. L'amas de la Croix du Sud (pl. XLI), que nous avons vu formé d'un grand nombre d'étoiles blanches, parsemées de quelques étoiles rouges, vertes et bleues, apparaît comme une nébuleuse blanche. D'un autre côté, nous avons cité un amas du ciel austral entièrement composé d'étoiles bleues.

La coloration de quelques nébuleuses peut donc s'expliquer aisément par la couleur prédominante des étoiles dont elles sont formées. J. Herschel cite une nébuleuse planétaire, dont la lumière a l'éclat d'une étoile de sixième à septième grandeur, et dont le disque, légèrement elliptique, a un bord vif, clair, bien déterminé, et se distingue « par sa couleur qui est d'un beau bleu foncé, tirant un peu sur le vert[1]. » Le même

1. *Outlines of Astronomy*, 6e édit., p. 645.

astronome cite trois autres nébuleuses, dont la couleur est celle d'un bleu de ciel un peu clair. Comme ces dernières nébuleuses sont toutes des nébuleuses planétaires, il faut, si l'on admet l'hypothèse d'une matière diffuse, supposer que sa lumière a elle-même une couleur particulière, ce qui d'ailleurs n'offre aucune difficulté. La nébuleuse d'Orion offre, dans toutes ses parties, une teinte bleu-verdâtre, d'autant plus remarquable qu'elle se trouve être, comme l'a remarqué Secchi, celle d'un assez grand nombre d'étoiles de la même constellation. On va voir plus loin que cette nébuleuse est partiellement formée de masses gazeuses incandescentes.

Indépendamment des analogies de couleur, de distribution et, après tout et surtout, de constitution, qu'un grand nombre de nébuleuses présentent avec les étoiles, disséminées ou réunies en couples, il semblerait aujourd'hui constaté qu'il y a entre elles une ressemblance de plus : je veux parler de la variabilité d'éclat. Deux nébuleuses, situées toutes les deux dans la constellation du Taureau, ont présenté de singuliers phénomènes. La première, voisine d'une étoile de dixième grandeur d'éclat variable, a offert des variations qui semblent correspondre avec celles de l'étoile[1]; elle a même fini par disparaître. La seconde nébuleuse, située près de l'étoile ζ du Taureau, après avoir augmenté graduellement d'éclat pendant plus de trois mois[2], disparut.

Des phénomènes analogues avaient été déjà constatés par

1. D'Arrest, Hind, Chacornac.

2. Observée par M. Chacornac. La disparition ne fut décidément constatée que plus de six ans après le maximum d'éclat. Il eût été intéressant de savoir si, aux phases d'accroissement, a succédé une période de décroissance, ou si la disparition a été subite. La disparition d'une nébuleuse et la diminution lente et progressive de son éclat s'expliqueraient dans la théorie de Schiaparelli, si l'on admettait avec cet astronome que, parmi les nébuleuses, il en est qui s'approchent ou s'éloignent du système solaire. Mais ici, la disparition ayant suivi un accroissement d'éclat, ne peut s'expliquer par le mouvement de la nébulosité.

W. Herschel. Deux étoiles, qui s'étaient montrées, en 1774, entourées de nébulosités circulaires, ne laissaient plus apercevoir aucune trace de ces enveloppes en 1811. Arago a signalé cet autre fait, qui se rapporte au même ordre de transformations : « Lacaille, dit-il dans une note de la bibliographie de W. Herschel, pendant son séjour au Cap, voyait dans la constellation d'Argo cinq petites étoiles au milieu d'une nébuleuse, dont M. Dunlop, avec de bien meilleurs instruments, n'apercevait point de trace en 1825. »

La comparaison des dessins de Lamont, d'Herschel, de Liapounov et de Bond a suggéré l'idée que la nébuleuse d'Orion a subi, dans les intervalles des observations, des changements assez importants. Ce fut, dès l'origine, l'opinion de plusieurs astronomes, qui trouvaient des différences notables entre leurs représentations de la nébuleuse. Ces différences provenaient alors de l'imperfection des instruments et de l'inégalité de leur netteté et de leur pouvoir. Cependant, il est assez remarquable qu'Huygens n'ait pas vu la nébulosité isolée de la partie boréale, bien qu'il ait noté l'étoile visible au centre, nébulosité que Mairan a vue et dessinée. Les différences signalées entre les observations modernes, bien que moins frappantes que celles d'il y a un ou deux siècles, doivent-elles être mises sur le compte des instruments ou des circonstances atmosphériques? J. Herschel, à ce sujet, fait à la vérité remarquer combien il est difficile de représenter avec exactitude les diverses parties d'objets aussi complexes, les intensités relatives, les positions et les contours exacts de lueurs si faibles, et dont l'aspect change aussi bien avec le pouvoir optique qu'avec la pureté plus ou moins grande de l'atmosphère. Cependant, l'opinion de Struve est que, s'il n'y a pas eu de réels changements de forme, il n'en est pas de même de l'intensité lumineuse des diverses parties.

« Les observations concernant la distribution et l'éclat de la matière nébuleuse, dit-il, n'accusent *presque* aucun chan-

gement de forme, mais bien des fluctuations dans l'état des différentes parties. L'impression générale que j'ai reçue de ces observations est que la partie centrale de la nébuleuse se trouve dans un état d'agitation continuelle comme la surface d'une mer. » (O. Struve, Observations de Poulkowa, *Mémoires de l'Académie des sciences de Saint-Pétersbourg*, 1862.) M. Liapounov exprimait une opinion plus tranchée. En comparant les résultats obtenus par J. Herschel, Lamont et Bond, il était frappé « de la grande différence qui existe dans les dessins de MM. Herschel et Bond, par rapport aux formes et à la constitution de la région centrale, la plus lumineuse et la mieux définie de toutes les parties de la nébuleuse. Il est presque impossible de concilier sous ce rapport les deux dessins, sans admettre la supposition d'un changement considérable qu'aurait subi cette région dans l'intervalle écoulé entre les époques des deux observations. » (*Observations de la nébuleuse d'Orion faites à Cazan.*) Ce savant avait remarqué du reste l'état d'agitation, signalé par Struve, de cette même région centrale, et son journal d'observation du 24 février 1851 portait la note suivante : « Toute la région me paraît offrir aujourd'hui les apparences d'une surface liquide, qui se trouve en mouvement ondulatoire rapide. » Il reste à savoir si la cause de cette agitation apparente n'était pas dans l'état des couches de l'air et dans notre propre atmosphère.

J. Herschel, dans ses observations du Cap, a publié un catalogue de 150 étoiles contenues dans l'étendue de la nébuleuse d'Orion; ces étoiles, presque toutes comprises entre la 10e et la 18e grandeur (26 seulement sont entre la 5e et 10e), ont été soigneusement étudiées au point de vue de leur éclat relatif, et de leur position. Liapounov en a identifié 83 avec ses propres observations, et le grand mémoire de G. P. Bond a continué des recherches analogues, qu'il a étendues d'ailleurs à toute la région nébuleuse comprise au nord et au sud de θ, jusqu'aux étoiles c et ι d'Orion. 1101 étoiles sont ren-

fermées dans les catalogues de l'astronome américain, 140 au-dessus de la 10ᵉ grandeur et 961 au-dessous. L'intérêt de ces travaux est de rechercher si, parmi ces étoiles innombrables paraissant liées à la nébuleuse, il y a des mouvements propres sensibles et aussi des variations d'éclat. D'après Liapounov, trois des quatre étoiles principales du trapèze auraient un mouvement en ascension droite, par rapport à la 4ᵉ, 0′. De plus, il paraît certain à Struve que plusieurs des étoiles de la région centrale sont variables. Cette hypothèse, basée sur la comparaison des étoiles de Liapounov et d'Herschel, a été confirmée depuis par G. P. Bond, et tout récemment par deux astronomes de l'observatoire de Toulouse, MM. Tisserand et Perrotin. Mais on ne sait encore quelles sont les phases de la variabilité, si elles sont périodiques ou irrégulières. Ce dernier cas paraît plus probable, si l'on songe à la connexion physique qui unit ces étoiles à la nébuleuse, et si l'on admet dans celle-ci la réalité de transformations, de condensation ou de diminution de lumière, que l'observation a tout au moins suggérées comme très-vraisemblables.

La variabilité, la disparition même d'une étoile isolée, s'expliquent à l'aide d'hypothèses satisfaisantes. Il n'en serait plus de même pour une nébuleuse, s'il fallait la considérer comme nécessairement composée d'étoiles distinctes, car alors comment admettre que la cause de variabilité d'une des étoiles exerce son influence au même instant sur tous les individus du groupe? Mais ces phénomènes paraissent moins étranges, aujourd'hui qu'on a acquis la certitude de l'existence d'une matière diffuse. Les variations d'éclat, l'extinction progressive ou même subite de la lumière sont, en effet, plus compréhensibles dans des masses de ce genre que dans un groupe d'étoiles.

§ 2. ANALYSE SPECTRALE DE LA LUMIÈRE DES NÉBULEUSES.

C'est une nébuleuse de la constellation du Dragon qui a été la première analysée au spectroscope par M. Huggins, en 1864. Son spectre (pl. XLII) lui parut formé uniquement de trois raies brillantes isolées, d'où il faut conclure que ce ne peut être un amas d'étoiles distinctes, mais une véritable nébulosité, une agglomération de matière gazeuse, lumineuse ou incandescente. La plus brillante des trois raies observées coïncidait avec la plus forte des raies particulières à l'azote. « Il peut se faire toutefois, dit M. Huggins, que la présence de cette raie seule indique une forme de matière plus élémentaire que l'azote, et que nos moyens d'analyse n'ont pas encore pu nous faire connaître. » La plus faible des raies du spectre de la nébuleuse coïncide avec la raie verte de l'hydrogène. Enfin la raie intermédiaire, peu éloignée de celle du baryum, ne coïncide pas toutefois avec elle.

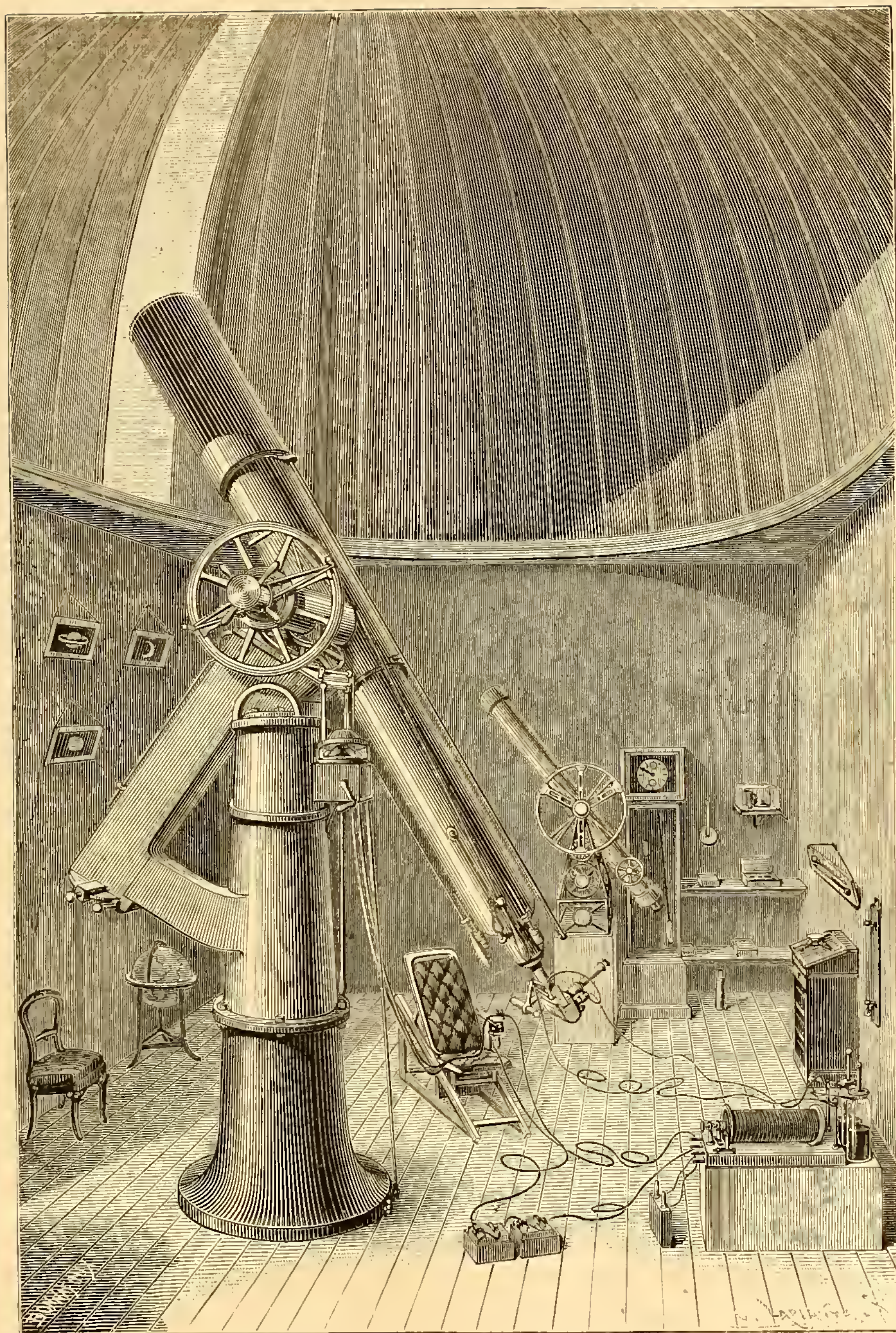
Outre les trois raies brillantes, on aperçoit aussi une bande colorée, formant un spectre continu extrêmement faible, et presque sans largeur, comme s'il provenait d'un point lumineux situé vers le centre de la nébulosité. La nébuleuse en question, qu'on rangeait auparavant parmi les nébuleuses planétaires, possède en effet un noyau petit, mais très-brillant. Huggins en conclut que probablement la matière formant ce noyau n'est pas à l'état de gaz, comme celle dont il est environné, qu'elle est sous la forme d'un brouillard de particules solides ou liquides incandescentes.

Le même savant a étudié en tout soixante-dix nébuleuses. Un tiers environ a présenté une constitution analogue à celle de la nébuleuse du Dragon, leurs spectres se réduisant à une ou plusieurs raies brillantes; les autres ont donné au contraire des spectres continus. Cette proportion de 1:2 des nébuleuses

gazeuses aux nébuleuses stellaires est peut-être plus forte que ne donnerait l'examen spectroscopique de la totalité des nébuleuses. M. Huggins, en effet, a choisi spécialement pour en faire l'objet de ses études, celles dont les caractères (la forme et la couleur) lui paraissaient devoir donner une constitution gazeuse.

Citons parmi les nébuleuses de constitution gazeuse, et dont le spectre est formé de trois raies brillantes, une petite nébuleuse du Verseau, qui, dans le télescope de lord Rosse, apparaissait sous la forme d'un globe coupé par un anneau ou par sa tranche, ainsi qu'on voit Saturne à l'une de ses phases; puis une autre nébuleuse de structure semblable, mais où l'anneau, vu de face, entoure le globe lumineux. Une nébuleuse en forme de spirale a donné 4 raies brillantes. La nébuleuse annulaire de la Lyre, ainsi que Dumb-bell, la célèbre nébuleuse du Renard, ont des spectres formés d'une raie brillante unique, qui est la plus forte des trois raies de la nébuleuse du Dragon.

Enfin la grande nébuleuse de θ d'Orion, qui, par sa teinte bleu-verdâtre, ressemble aux nébuleuses précédentes, a également fourni un spectre (pl. XLII) composé de 4 raies brillantes; ces raies sont bien définies et leurs intervalles tout à fait obscurs; la plus brillante et la moins réfrangible coïncide avec l'une des composantes de la double raie de l'azote; la seconde est peut-être une ligne du fer, et les deux autres sont en coïncidence exacte avec les lignes F et G de l'hydrogène. La nébuleuse d'Orion est donc encore une nébulosité gazeuse. Mais il ne faut pas oublier que lord Rosse a vu, dans la nébuleuse annulaire de la Lyre et dans Dumb-bell, des points brillants; que le même astronome, armé de son puissant télescope, a découvert, sur le fond de la nébuleuse d'Orion, de très-petites étoiles rouges (cette teinte est peut-être due à un effet de contraste), étoiles trop fines pour fournir un spectre visible. Tout n'est donc pas dit sur la véritable structure de ces grandes masses; mais il



TÉLESCOPE DE TULSE HILL

installé par M. W. Huggins pour ses études de spectroscopie céleste.

ne ressort pas moins de l'analyse précédente, ce fait d'une si haute importance, à savoir que l'hypothèse de W. Herschel sur l'existence d'une matière à l'état de nébulosité diffuse, brillant de sa propre lumière, était fondée.

La nébuleuse d'Andromède est de constitution toute différente. Son spectre n'est plus formé de raies brillantes séparées : il donne une bande de lumière continue, mais il est incomplet : le rouge et une partie de l'orangé manquent. Or, les véritables amas stellaires, les nébuleuses résolues par le télescope en points brillants distincts ont également un spectre continu. Ainsi l'amas stellaire d'Hercule donne un spectre semblable. Ce résultat s'accorde bien avec les observations de Bond, qui a décomposé en partie la nébuleuse d'Andromède, et y a compté, ainsi que nous l'avons rapporté plus haut, jusqu'à 1500 étoiles distinctes.

En résumé, sur soixante nébuleuses dont la lumière a été analysée par Huggins, 41 ont donné un spectre continu. Sur ce nombre, il y a 10 amas stellaires et 15 autres nébuleuses considérées par les astronomes comme résolubles en étoiles. Aucune des 19 nébuleuses donnant un spectre formé de raies brillantes n'a pu être résolue en étoiles.

§ 3. DISTANCES ET MOUVEMENTS DES NÉBULEUSES.

Les mêmes questions que nous avons vues posées et en partie résolues pour les étoiles, peuvent se poser pour les nébuleuses : mouvements périodiques annuels apparents dus à l'aberration de la lumière ou au mouvement de la Terre dans son orbite ; mouvements périodiques réels indiquant la révolution mutuelle de deux corps associés en groupes ; mouvements progressifs apparents ou réels dus à la translation de notre propre système, ou à la translation propre des nébuleuses dans l'espace.

Mais c'est à peine si quelques tentatives ont été faites pour résoudre ces diverses questions. Laugier, en 1847, a étudié les mouvements propres de trois nébuleuses, qui portent les numéros 3, 11 et 28 dans le catalogue de Messier[1], et que ce dernier astronome avait observées en 1764. En ramenant à la même époque du 1er janvier 1847 les positions de ces trois amas observées par Messier et les siennes propres, Laugier trouve des différences en ascension droite et en déclinaison assez fortes pour qu'elles ne puissent être attribuées aux erreurs d'observation ; suivant lui, ellesreprésentent en partie les déplacements de ces nébuleuses de 1764 à 1847, c'est-à-dire pendant un intervalle de 83 ans. Les mouvements propres annuels, mesurés en arc de grand cercle, sont environ de 1″.5 pour chacune d'elles, et par conséquent sont comparables aux mouvements propres des étoiles.

Ces résultats importants ont suggéré la pensée de confectionner des catalogues très-précis des positions d'un certain nombre de nébuleuses; Laugier, en 1854, Schœnfeld et Schultz cette année même, ont publié des recueils de ce genre qui fourniront pour l'avenir de précieux matériaux.

Les mouvements propres des nébuleuses constatés, on pourrait en déduire leur vitesse de translation dans l'espace, vitesse relative comme celle des étoiles, puisque le mouve-

1. La première, de 5′ à 6′ de diamètre selon J. Herschel, est un amas globulaire des Chiens de chasse, dont le centre est très-brillant, et qui renferme plus de mille étoiles de la 11e à la 15e grandeur. La seconde, située dans l'Écu de Sobieski, a 10′ à 12′ de diamètre; Messier l'a décomposée en un grand nombre d'étoiles de 11e grandeur, excepté une, qui est de 9e. Enfin, la troisième, dans le Sagittaire, est également un amas, très-riche et excessivement condensé au centre, dont les composantes sont de 14e à 15e grandeur. Les mouvements propres constatés par Laugier sont :

	En asc. dr.	En déclinaison.
3M.	— 1′ 7″	+ 1′ 40″
11M.	+ 1′ 55″	— 1′ 20″
28M.	+ 2′ 9″	— 58″

ment propre absolu du système solaire est encore inconnu. Mais il faudrait connaître leurs distances, et aucune mesure de parallaxe n'a encore été tentée, que nous sachions, ni en tout cas réalisée. Il faut sur ce point se borner aux conjectures ou aux probabilités. Les nébuleuses sont-elles à des distances comparables aux distances stellaires, ou au contraire, beaucoup plus reculées? Pour les amas, cette dernière hypothèse nous semble plus probable, si l'on s'en réfère aux relations supposées entre les distances et les grandeurs des étoiles, ainsi que nous l'avons établi dans un précédent chapitre. En se basant sur cet ordre de considérations, on a calculé que la nébuleuse d'Andromède est 75 fois plus éloignée que les étoiles de 9e grandeur, de sorte que la lumière, pour venir de cet immense amas stellaire jusqu'à notre système, mettrait plus de quarante mille ans!

Mais on peut, comme l'a fait sir J. Herschel, aborder le problème de la distance des nébuleuses d'une autre façon, et reconnaître que, dans certains cas au moins, cette distance est comparable à celle des étoiles d'une grandeur déterminée. Considérant comme à peu près sphérique la plus grande des deux nuées de Magellan, et partant de ses dimensions apparentes qui lui donnent un diamètre d'environ 3 degrés, cet éminent astronome en concluait qu'il n'y a pas, entre la distance des objets les plus éloignés dont elle est composée et celle des plus rapprochés, une différence supérieure au dixième de la distance qui nous sépare de son centre. « En conséquence, dit-il, l'éclat des objets les plus voisins ne peut être beaucoup agrandi, ni celui des plus éloignés beaucoup affaibli par cette différence de distance. Cependant, à l'intérieur de cet espace globulaire, j'ai noté au delà de 600 étoiles de 7e, 8e, 9e et 10e grandeur, environ 300 nébuleuses et amas, globulaires ou autres, à tous les degrés de résolubilité, ainsi que d'innombrables petites étoiles de toutes les grandeurs inférieures, depuis la 10e jusqu'à celles dont la multitude et

la petitesse constituent la partie irrésoluble de la nébulosité, le tout disséminé sur une étendue de quelques degrés carrés. S'il ne s'agissait que d'un seul objet, on pourrait avec quelque vraisemblance soutenir que son apparente sphéricité est due seulement à un effet de raccourci, et qu'en réalité il existe une plus grande différence proportionnelle de distance entre les parties les plus rapprochées et les plus éloignées. Mais une telle disposition, improbable même dans un cas unique, doit être rejetée comme objection valable, dès qu'elle s'applique à deux. Il faut donc considérer comme un fait démontré que des étoiles de 7e et de 8e grandeur coexistent avec des nébuleuses irrésolubles à des distances dont le rapport peut être représenté par les nombres 9 et 10. » Le raisonnement qui précède est juste; mais il ne nous semble plus applicable aux étoiles éparses et aux nébuleuses isolées des autres régions du ciel, à moins qu'on ne les considère les unes et les autres comme autant d'individus d'une association unique, ainsi que sont les étoiles, les amas et les nébuleuses des deux nuées de Magellan.

Revenons aux mouvements des nébuleuses. On a vu qu'un certain nombre forment probablement des couples, analogues aux étoiles, et qu'il est permis d'espérer qu'on pourra un jour constater des déplacements dans les composantes, indiquant un mouvement de révolution. Aucune observation n'a encore justifié cette conjecture. Cependant la nébuleuse double (1905 H), observée par Herschel entre 1825 et 1833, pourrait être invoquée comme un exemple de mouvement propre et aussi de révolution des composantes. En effet, celles-ci, toutes deux de forme ovale allongée, avaient alors la position qu'indique la figure 336, 1. Elle a été observée à plusieurs reprises, de 1848 à 1861, à l'aide du grand télescope de lord Rosse, et dessinée à cette dernière époque par M. Hunter. En 1848, la distance des composantes parut plus grande que celle du dessin de J. Herschel. En 1855, les deux nébu-

leuses, au lieu d'être placées en ligne droite sur le prolongement l'une de l'autre, étaient sur deux lignes parallèles; et en 1861, les axes, au lieu d'être parallèles, faisaient, comme le montre la figure (336, 2), un angle d'environ 16 degrés.

Nous avons vu que l'analyse spectrale permet de mesurer le mouvement et la vitesse d'un astre, selon le rayon visuel, soit qu'il s'approche, soit qu'il s'éloigne de la Terre. Il suffit, pour cela, que le spectre de sa lumière ne soit pas continu, et qu'il renferme des lignes sombres ou des lignes brillantes appartenant à une substance chimique connue. Toute déviation vers le rouge ou vers le violet d'une telle ligne indique le mouvement et son sens, et permet d'en mesurer approximativement la vitesse. M. Huggins a tenté l'application de cette méthode au mouvement des nébuleuses. Mais les nébuleuses stellaires ne donnant, comme on l'a vu, qu'un spectre continu très-faible, sans ligne distincte, échappent par cela même à ce genre de recherches, que le savant astronome a dû restreindre aux seules nébuleuses gazeuses. Celles-ci, comme on vient de le voir en effet, ont un spectre formé de 3 ou 4 raies brillantes, qui sont généralement des raies de l'hydrogène ou de l'azote, et il a été possible de comparer la position des plus brillantes et des mieux définies aux raies terrestres de ces corps simples. C'est une recherche très-délicate et difficile, qui n'a pas encore donné de résultats certains. Toutefois, M. Huggins croit pouvoir conclure qu'aucune des nébuleuses observées n'a une vitesse supérieure à 25 milles, soit 40 kilo-



Fig. 336. Mouvement probable des composantes de la nébuleuse double 1905 II. — 1. Observation et dessin de J. Herschel. — 2. Observation et dessin de M. Hunter.

mètres par seconde, la vitesse de la Terre comprise. Il donne les nombres suivants, pour 7 nébuleuses, qui toutes s'éloignent de notre système (correction faite du mouvement de notre planète à l'instant de l'observation) :

Nébuleuses gazeuses.	Vitesse d'éloignement.		
M42 (360 J.H).	17 milles ou	27	kil. par seconde.
(1970 H)	12 —	19	—
(IV.37).	1 —	1.6	—
(2000 H)	2 —	3.2	—
M.57. (2023 H)	3 —	4.8	—
(2047 H)	14 —	22	—
(2241 H)	13 —	21	—

La cinquième de cette liste est la fameuse nébuleuse annulaire de la Lyre. De son côté, M. Vogel a trouvé pour le mouvement de la nébuleuse d'Orion, qui s'éloigne aussi de la Terre, une vitesse d'environ 17 milles ou 27 kilomètres par seconde.

LIVRE TROISIÈME

STRUCTURE DE L'UNIVERS VISIBLE

Dans notre étude descriptive du *Monde Sidéral*, nous avons rencontré trois sortes d'objets : étoiles éparses, disséminées sans lien apparent dans toutes les régions du ciel, et qu'on pourrait appeler étoiles *sporadiques;* amas sphériques où les étoiles condensées sont maintenues sans doute autour d'un point central par la force de gravitation, et amas irréguliers dont la liaison physique, moins évidente, est cependant probable; enfin nébuleuses, soit gazeuses, soit stellaires.

Nous avons dit tout ce qu'on sait des étoiles et des nébuleuses, de leurs distances et de leurs mouvements, de leurs associations, de leur constitution physique ou chimique. Il nous reste à donner une idée de leur distribution dans l'espace, à dire ce que la science, appuyée sur les observations accumulées de trois siècles, est parvenue à savoir sur les relations de position et de distance des étoiles, des amas et des nébuleuses. La question qui nous reste à traiter, aussi intéressante pour la science que pour la philosophie, est celle dont l'énoncé forme le titre de ce troisième Livre : *Structure de l'Univers visible.*

I

DISTRIBUTION DES ÉTOILES.

§ 1. DISTRIBUTION DES ÉTOILES VISIBLES A L'ŒIL NU.

Les étoiles non réunies en amas sont-elles distribuées au hasard sur la voûte céleste, ou mieux dans les profondeurs de l'espace? Non; et cela est évident avant tout examen de détail, puisque nous savons déjà que la Voie Lactée, dont la zone entoure le ciel entier, est presque uniquement composée d'étoiles. Il y a là un plan de condensation stellaire si marqué, que c'est à lui que vont se rapporter nécessairement toutes les mesures relatives à la richesse en étoiles des diverses régions célestes. Mais comme la Voie Lactée se compose principalement d'étoiles, invisibles séparément, dès qu'on ne se sert plus du télescope, il reste à savoir si l'accumulation stellaire de la zone galactique a lieu également pour les étoiles des six ou sept premiers ordres de grandeur, c'est-à-dire des étoiles visibles à l'œil nu.

« Si l'on ne considère, dit sir J. Herschel, que les trois ou quatre classes les plus brillantes, on trouve que ces étoiles sont distribuées sur la sphère à peu de chose près uniformément; toutefois, on peut observer une prédominance marquée dans leur nombre, particulièrement dans l'hémisphère austral, le long d'une zone qui suit la direction d'un grand cercle

passant par ε d'Orion et α de la Croix du Sud. Mais si nous faisons le compte de toutes les étoiles visibles à l'œil nu, nous devrons constater un rapide accroissement de nombre, à mesure qu'on approche des bords de la Voie Lactée. » On a cherché à mettre cette dernière augmentation en évidence de plusieurs manières. Voici, d'abord, d'après Schwinck, comment se répartissent les 12148 étoiles de la 1re à la 7e grandeur dont ce savant avait marqué les positions sur sa carte céleste :



Fig. 337. Distribution des étoiles, de la 1re à la 7e grandeur, d'après Schwinck. — Coïncidence des maxima avec la Voie Lactée.

Ascension droite.	Nombre d'étoiles.
De 3h 20m à 9h 20m	3147
— 9h 20m à 12h 20m	2627
— 15h 20m à 21h 20m	3523
— 21h 20m à 3h 20m	2851

On peut voir, en jetant les yeux sur la figure 337, que les régions des deux hémisphères qui renferment le plus d'étoiles sont celles que la Voie Lactée couvre dans sa plus grande étendue. Il est vrai que les nombres précédents renferment les étoiles de 7e grandeur, qui ne sont pas visibles à l'œil nu. Les recherches de W. Struve sur la répartition des étoiles

des neuf premiers ordres dans une zone de 30° de largeur (de + 15° à — 15° de déclinaison) selon les heures d'ascension droite, indiquent deux maxima principaux, *m* et *m'*, pour les étoiles des six premiers ordres (fig. 338) : l'un, entre les heures IV et V, l'autre entre les heures XVIII et XIX. Le premier n'est pas éloigné des points où la Voie Lactée rencontre la zone ; il n'y a pas toutefois coïncidence exacte, comme cela se voit pour le second maxima. La figure 338, qui donne la

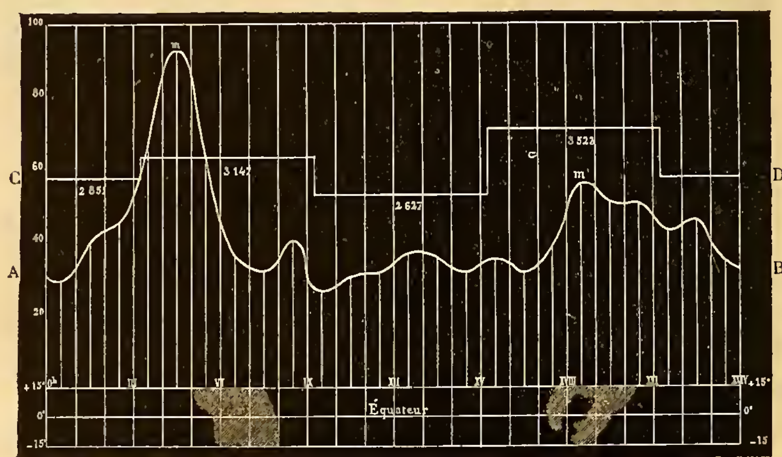


Fig. 338. Distribution en ascension droite des étoiles des six et sept premières grandeurs. CD, nombre d'étoiles des grandeurs 1 à 7, d'après Schwinck. AB, courbe stellaire dans une zone équatoriale de + 15° à — 15°, d'après W. Struve.

courbe des variations des nombres d'étoiles visibles à l'œil nu dans cette zone, montre clairement la façon dont elles s'y trouvent distribuées.

Sir J. Herschel a publié, dans ses *Observations du Cap*, le résultat de ses recherches sur la distribution des étoiles de tout ordre, non plus suivant l'ascension droite, mais selon la distance des étoiles au cercle galactique ou à ses pôles. On va voir que ce résultat est très-significatif pour les étoiles inférieures à la 9e grandeur ; mais il est beaucoup moins probant pour les étoiles visibles à l'œil nu, ou même pour celles

des sept et huit premiers ordres d'éclat. Les nombres qui expriment la densité relative des zones parallèles à la Voie Lactée, et allant de 15° en 15° à partir du pôle galactique austral, sont les suivants, en ce qui concerne les étoiles des sept premiers ordres :

	Distances des zones au pôle sud de la Voie Lactée.	Densités stellaires relatives.
Zone comprise entre	0° et 15°	465
—	15 — 30	486
—	30 — 45	459
—	45 — 60	293
—	60 — 75	275
— Cercle	75 — 90	633
— galactique	90 — 105	376
—	105 — 120	615
—	120 — 135	294
—	135 — 150	0

Il y a bien un maximum dans la zone australe de 15° de large, qui comprend la Voie Lactée ; mais il s'en faut que le nombre des étoiles aille croissant du pôle sud au cercle, et la loi n'est pas mieux marquée du côté du nord. Il semble bien résulter des statistiques précédentes, qu'il y a plus d'étoiles visibles à l'œil nu dans la Voie Lactée que dans le reste du ciel, mais il n'est pas prouvé que leur nombre aille en augmentant depuis les pôles galactiques jusqu'aux limites boréales ou australes de la zone. On va voir, au contraire, que cette loi de condensation est des plus marquées pour les étoiles plus petites, et qu'elle l'est d'autant plus qu'on descend davantage dans l'ordre des grandeurs.

§ 2. DISTRIBUTION DES ÉTOILES TÉLESCOPIQUES.

La figure 338 donne la répartition des étoiles, jusqu'à la sixième grandeur, selon les heures d'ascension droite pour

une zone qui s'étend à 15° de part et d'autre de l'équateur. Une courbe analogue a été tracée dans la planche L, d'après les mêmes recherches de W. Struve, mais appliquées à toutes les étoiles télescopiques de la 1re à la 9e grandeur. Il est aisé de voir, par la comparaison de ces courbes, que la condensation est également marquée dans les régions de la zone que traverse la Voie Lactée ; la seule différence est que les maxima ne tombent point sur les mêmes heures. Pour les étoiles visibles à l'œil nu, c'est la Ve et la XIXe heures qui sont les plus riches ; pour les étoiles des neuf premiers ordres de grandeur, c'est dans la VIe et la XVIIIe heures que tombent les plus fortes densités stellaires. L'influence du voisinage de la Voie Lactée n'en paraît pas moins évidente, pour les unes comme pour les autres.

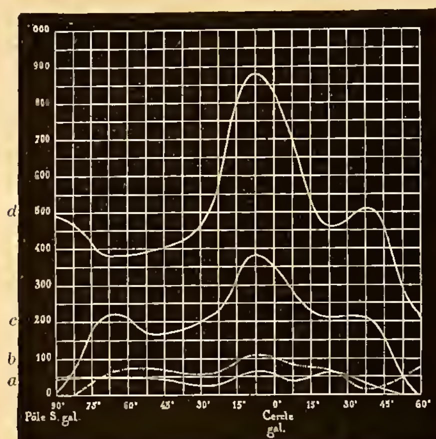


Fig. 339. Distribution des étoiles rapportées au cercle et aux pôles galactiques. — *a.* Courbe des étoiles des 7 premières grandeurs. — *b.* Étoiles de la 8e gr. — *c.* Étoiles de la 9e gr. — *d.* Étoiles de la 10e gr.

Mais cette loi se manifeste bien plus clairement, si l'on prend, comme l'a fait sir J. Herschel, le plan ou cercle galactique pour équateur stellaire, et si l'on cherche la loi de distribution des étoiles dans des zones parallèles à ce cercle et s'étendant de part et d'autre jusqu'aux pôles de la Voie Lactée. On a vu, dans le paragraphe précédent, que la loi de condensation est pour ainsi dire insensible, tant que l'on ne considère que les étoiles visibles à l'œil nu, et même les étoiles des huit premières grandeurs. Mais à mesure que l'on considère des étoiles d'un plus faible éclat, la richesse comparative des zones, voisines de la Voie Lactée, devient plus frappante. « Pour les étoiles de 9e et de 10e grandeur, dit J. Herschel, l'accrois-

sement, bien qu'indiqué sans équivoque sur une zone de 30° de largeur de part et d'autre de la Voie Lactée, n'a pourtant rien de remarquable. Avec les étoiles de la 11e grandeur, il commence à devenir apparent, quoique faible encore, si on le compare avec celui que présente l'ensemble des étoiles de toutes les grandeurs inférieures à la 11e; ces étoiles, en effet, comprennent les seize dix-septièmes de la totalité des étoiles que renferme la zone de 30° dont on vient de parler. » Herschel tire de là deux conclusions. La première, c'est que les étoiles les plus brillantes sont réellement, prises en masses, plus voisines de nous que les plus petites, sans quoi le nombre des étoiles très-brillantes devrait croître en proportion du nombre ou de la densité stellaire des régions du ciel que l'on considère; dans la Voie Lactée, il devrait donc y avoir une prépondérance numérique d'étoiles des premières grandeurs. La deuxième conclusion est que la profondeur à laquelle est plongé notre système dans la strate d'étoiles qui constitue la Voie Lactée, comptée à partir de la limite australe de la strate, est égale à la distance des étoiles de 9e à 10e grandeur, et ne dépasse certainement pas celle des étoiles de 11e grandeur.

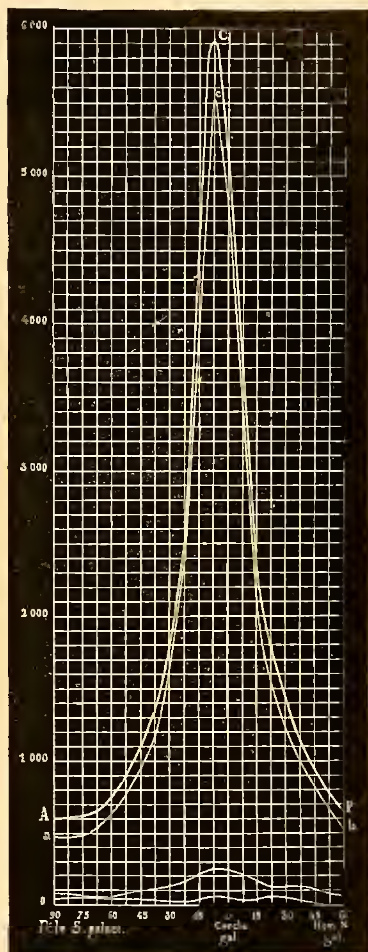


Fig. 340. Distribution des étoiles relativement au plan et aux pôles de la Voie Lactée. — Étoiles de la 9e, 10e, 11e, 12e grandeur et au-dessous. A C B, courbe du nombre total.

En résumé, il résulte des considérations qui précèdent, que les étoiles visibles à l'œil nu et la plupart des étoiles inférieures jusqu'à la 11e grandeur, sont à peu près également distribuées tout autour de notre système; que, dès lors, elles constituent un amas dont notre propre Soleil fait partie, que cet amas enfin est partie intégrante du système d'ordre supérieur formé par la Voie Lactée tout entière. Il nous reste à voir comment se distribuent les autres amas d'étoiles, et s'ils ont, avec le système galactique, une connexion pareille à celle que nous venons de signaler.

§ 3. DISTRIBUTION DES AMAS STELLAIRES ET DES NÉBULEUSES.

Pour nous faire une idée de la manière dont les nébuleuses sont réparties à la surface du ciel, nous allons nous appuyer sur un remarquable travail, dû à un astronome anglais, M. Cleveland Abbe, et dont les conclusions sont basées sur l'analyse du catalogue général de sir J. Herschel.

Ce catalogue comprend 5076 objets qui, ainsi que nous l'avons dit dans la note de la page 814, se décomposent en 1034 amas stellaires, ou nébuleuses résolubles, et en 4042 nébuleuses irréductibles. Comment ces différents objets se distribuent-ils dans l'espace? Pour répondre à cette question, M. Abbe partage d'abord la surface entière du ciel en trois zones principales : la première est la Voie Lactée; la seconde comprend toute la partie du ciel située au nord de la Voie Lactée; la troisième est la zone située au sud. Toutefois, dans cette troisième partie, il met à part les deux régions particulières qui constituent les nuées de Magellan, le Grand et le Petit Nuages. Le tableau suivant, qui renferme 11 nébuleuses de plus, montre la distribution des nébuleuses et amas, en supposant à la Voie Lactée une largeur moyenne de 10° :

LE CIEL

PL. L

DISTRIBUTION
des Amas Stellaires et des Nébuleuses
dans les deux Hémisphères
d'après
sir J. Herschel et Sidney Waters

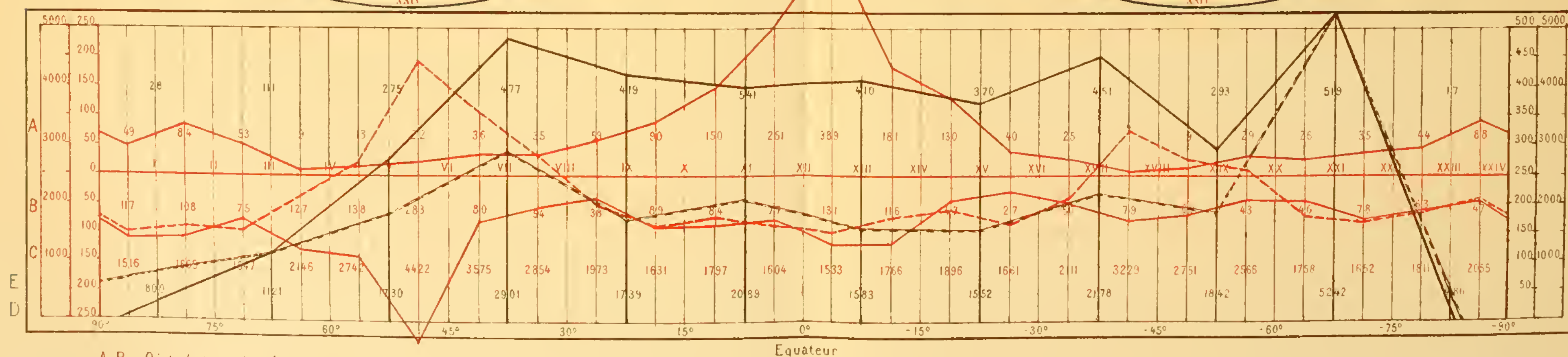
Hémisphere Boreal

Hémisphere Austral

Nebuleuses

. Amas stellaires

E. Guillemin del et sc.



A.B. *Distribution des Amas stellaires et des Nebuleuses dans les 2 hemisphères, selon les heures d'ascension droite, d'après les catalogues de Sir J. Herschel*

C. *Étoiles des 9 premières grandeurs (Zônes d'Argelander, de + 15° à - 15° de déclinaison) selon les heures d'ascension droite.*

D *Distribution des Amas et des Nébuleuses selon la déclinaison boréale et australe*

E *Courbe des densités relatives, indiquant la richesse en amas stellaires et en Nébuleuses des Zônes de déclinaison boréale et australe*

ZONES OU RÉGIONS.	Aires.	NOMBRE DES AMAS ET NÉBULEUSES. Amas stell.	Amas glob.	Nébul. résol.	Nébuleuses.	Totaux.
Au N. de la Voie Lactée.	180	150	31	262	2351	2794
Dans la Voie Lactée. . .	30	254	19	12	73	358
Au S. de la Voie Lactée.	130	76	35	80	1356	1547
Dans le Grand-Nuage . .	15	52	14	36	248	350
Dans le Petit-Nuage. . .	5	3	3	7	25	38
Totaux. . . .	360	535	102	397	4053	5087

Pour se rendre compte de la distribution, il faut évidemment rapporter les nombres qui précèdent, à la surface qu'occupe chaque zone, leurs aires étant très-inégales, ainsi que l'indiquent les nombres de la 1re colonne. Nous avons fait le calcul, d'abord en cherchant la densité générale, les nébuleuses et les amas étant confondus ; puis, séparément, d'une part pour les amas et nébuleuses résolubles, c'est-à-dire pour les objets de nature stellaire ; d'autre part pour les nébuleuses seules, regardées comme irréductibles. En voici le résultat :

ZONES ET RÉGIONS CÉLESTES.	DENSITÉS COMPARÉES DES RÉGIONS DU CIEL en nébuleuses et amas stellaires réunis.	en amas stellaires.	en nébuleuses irréductibles.
Au N. de la Voie Lactée . . .	1.098	0.853	1.160
Dans la Voie Lactée	0.845	2.308	0.213
Au S. de la Voie Lactée . . .	0.843	0.512	0.615
Dans le Grand-Nuage	1.650	2.967	1.468
Dans le Petit-Nuage	0.538	0.906	0.444

La signification des nombres donnés par ces tableaux n'est pas douteuse.

En ne considérant d'abord que les nombres absolus donnés par le premier tableau, il est visible que les amas stellaires, globulaires ou autres, se trouvent en plus grand nombre dans la Voie Lactée que dans le reste du ciel, boréal ou austral ; tandis que le contraire se présente pour les nébuleuses, peu nombreuses dans la Voie Lactée, et fort répandues dans les deux autres zones. Sous ce rapport, les deux nuées magellaniques participent à la constitution de ces dernières, et sont

aussi plus riches en nébuleuses qu'en amas. Mais, comme les aires occupées par ces différentes régions célestes sont fort inégales, il est plus instructif de comparer les densités relatives; c'est ce que permet le second tableau, où l'on a pris pour unité, dans chaque colonne, la densité du ciel tout entier. La première colonne, où nébuleuses et amas se trouvent

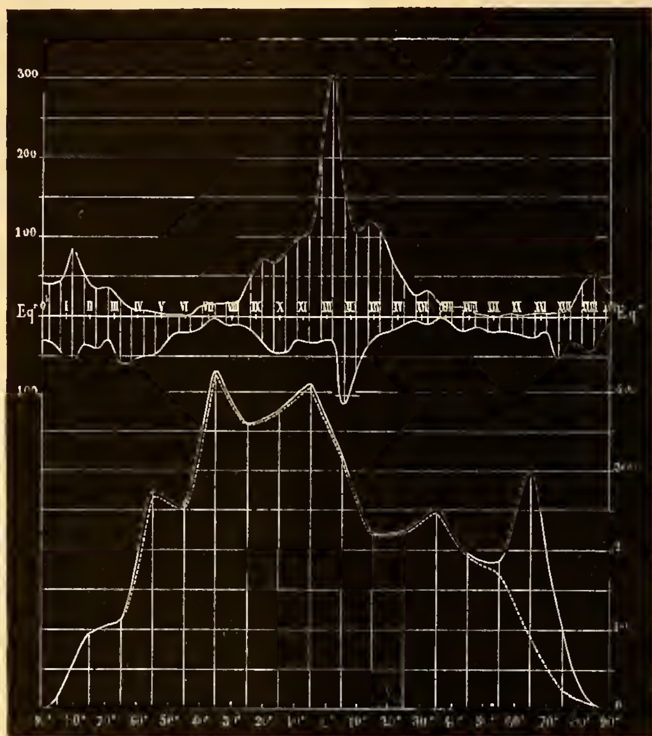


Fig. 341. Courbes de distribution des nébuleuses, d'après M. Cleveland Abbe : 1° suivant les ascensions droites; 2° suivant les déclinaisons.

confondus, ne donne qu'une simple indication; c'est que l'hémisphère boréal est plus riche que l'hémisphère austral, si l'on fait abstraction des deux Nuées de Magellan, et aussi que la Voie Lactée elle-même. La comparaison des deux dernières colonnes est plus significative. Elle prouve que la région de la Voie Lactée est quatre fois aussi riche en amas et nébuleuses stellaires que la zone boréale, et plus de six fois autant

que la zone australe; elle dépasse même à ce point de vue l'une et l'autre des nuées magellaniques. Au contraire, la Voie Lactée est très-pauvre en nébuleuses, tandis que les régions extérieures, celle du nord notamment, prennent sur elle, à cet égard, une supériorité marquée.

La Voie Lactée a, en plusieurs points, une largeur supérieure à 10° ; M. Abbe a donc jugé intéressant d'étendre cette largeur à 30° et de voir comment se répartissent encore, dans cette hypothèse, les amas et les nébuleuses. Nous extrayons seulement de son tableau les nombres relatifs aux trois régions principales, en mettant de côté ceux des Nuées, qui ne changent point. En voici le résumé :

	NOMBRES		DENSITÉS RELATIVES	
	des amas et néb. stellaires	des nébuleuses irréductibles.	en amas et néb. stellaires.	en nébuleuses irréductibles.
Au N. de la Voie Lactée. . .	281	2215	0.693	1.332
Dans la Voie Lactée	512	255	2.368	0.287
Au S. de la Voie Lactée. . .	126	1299	0.424	0.781
Totaux. . .	919	3769		

La richesse de la Voie Lactée en objets stellaires, sa pauvreté en nébuleuses ressort toujours, bien que moins marquée, du nouveau tableau, tandis que les deux régions du ciel situées au nord et au sud de la zone conservent leur supériorité en nébuleuses et leur infériorité en amas.

Au reste on peut, en jetant un coup d'œil sur les deux hémisphères célestes de la planche L, juger de la répartition des nébuleuses et des amas, soit dans la Voie Lactée, soit en dehors, soit dans les nuées de Magellan. Les résultats de l'intéressante statistique comparée que nous venons de donner d'après M. Abbe s'y liront clairement, et suffiront pour apprécier les importantes conclusions qu'il en tire.

Voici maintenant ces conclusions :

I. « Les amas font partie de la Voie Lactée et sont plus rapprochés de nous que la moyenne de ses faibles étoiles.

II. Les nébuleuses résolues et non résolues se trouvent en général en dehors de la Voie Lactée, qui, par conséquent, est essentiellement stellaire. III. L'Univers visible se compose de systèmes, dont la Voie Lactée, les deux Nuées de Magellan[1] et les Nébuleuses sont autant d'individus; ces systèmes sont formés eux-mêmes d'étoiles (simples, multiples, ou groupées en amas) et de corps gazeux de formes tantôt régulières, tantôt irrégulières. »

Cette composition, presque exclusivement stellaire, de la Voie Lactée est d'autant plus remarquable, que, basée sur les catalogues les plus complets et donnant la connaissance du ciel tout entier, elle est conforme aux vues que W. Herschel émettait il y a plus de soixante ans, en s'appuyant sur un nombre bien plus restreint d'observations. Dans son Mémoire de 1811, l'illustre astronome de Slough trouvait, sur 263 amas, 225 amas situés dans la Voie Lactée, tandis que 38 seulement étaient en dehors de la grande zone : la proportion était de 6 à 1 environ. Laissant en effet de côté les deux Nuées qui sont des objets exceptionnels, la statistique de M. Abbe donne 477 amas dans la Voie Lactée et 88 en dehors : la proportion est à peu de chose près la même, 5.4 à 1. Herschel concluait alors que la Voie Lactée est « une collection immense d'étoiles, surtout irrégulièrement condensées. »

En examinant les deux hémisphères de la planche L, où les nébuleuses et les amas sont figurés par des points de couleurs différentes, on constate aisément la distribution de ces

1. Il y a cependant une distinction à faire entre les Nuées de Magellan et la Voie Lactée, en ce qui concerne leur composition. Tandis que les amas prédominent dans cette dernière, dans les deux nuages au contraire, ce sont les nébuleuses qu'on trouve en plus grand nombre. Sur 350 objets, le Grand-Nuage renferme 66 amas seulement et 284 nébuleuses; en réunissant aux amas les nébuleuses résolubles, on trouve encore 248 nébuleuses contre 102 groupes stellaires. Dans le Petit-Nuage, 6 amas contre 32 nébuleuses, ou même 13 groupes stellaires et 25 nébuleuses. La question serait de savoir si les nébuleuses de ces groupes sont gazeuses.

deux sortes d'objets, leur groupement à l'intérieur comme au dehors de la Voie Lactée, et l'accumulation si remarquable des nébuleuses dans l'hémisphère nord de la zone. Il y a là, dans le voisinage du pôle nord galactique, des régions particulièrement riches en nébuleuses : la Vierge, la Chevelure de Bérénice sont les plus intéressantes de ces régions. On peut constater aussi que la condensation n'est pas uniforme et que



Fig. 342. Région nébuleuse de la Vierge; fragment d'un dessin de M. Proctor.

les nébuleuses forment, dans l'un et l'autre hémisphère, des sortes de traînées, et, en certains points, des groupes qui ont quelque analogie avec les nuées de Magellan. Dans la composition de ces traînées, il est visible que les nébuleuses et les amas se trouvent mêlés.

Les figures 342 et 343, qui sont la reproduction de deux dessins de M. Proctor, représentent les régions nébuleuses de la Vierge et de la Chevelure de Bérénice. Le savant anglais fait

remarquer avec raison, que les innombrables étoiles disséminées dans les mêmes espaces célestes forment elles-mêmes des traînées, des files de points lumineux, et que les nébuleuses paraissent associées à cette disposition, qui ne semble pas être due au simple hasard de la perspective.

Enfin, outre la double accumulation des amas dans la Voie Lactée et des nébuleuses hors du cercle galactique, la planche L permet de reconnaître nettement une région, pau-

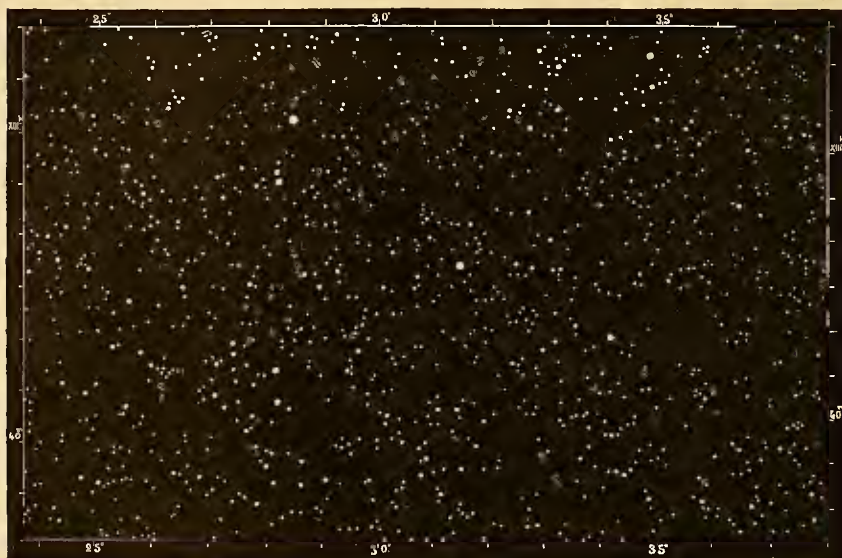


Fig. 343. Région nébuleuse de la Chevelure de Bérénice, d'après un dessin de M. Proctor.

vre à la fois en nébuleuses et en amas, laquelle longe en grande partie la Voie Lactée, au delà de ses deux limites, boréale et australe. Quelle est la signification de ce vide relatif, de cette zone de pauvreté nébulaire, qui sépare la région des amas de celles des nébuleuses ?

On peut répondre à cette question par trois hypothèses : ou bien, dans la zone dont nous parlons, les nébuleuses et les amas sont plus dispersés, moins condensés qu'ailleurs ; ou bien, l'Univers visible s'étend moins dans cette direction que dans le sens perpendiculaire au plan galactique ; ou enfin,

la zone de pauvreté nébuleuse indiquerait que, dans cette direction, les nébuleuses sont plus éloignées de nous que dans les autres régions; et leur distance seule les rendrait invisibles. Mais cette dernière hypothèse n'est pas probable, parce que l'accroissement du pouvoir télescopique n'a pas sensiblement accru la richesse de la zone en question. Restent donc les deux premières hypothèses. M. Abbe ne mentionne que la seconde et la regarde comme probable. Il pense que le plan galactique coupe à angle droit le grand axe d'un ellipsoïde allongé, ayant dès lors les mêmes pôles que la Voie Lactée, à l'intérieur duquel se trouvent uniformément réparties les 4134 nébuleuses connues, abstraction faite des deux Nuées qu'il regarde comme des nébuleuses accidentellement plus voisines de nous que les autres. Le Soleil, ou plutôt la Voie Lactée, aurait une position excentrique dans cet ellipsoïde, plus rapproché du sud que du nord; et, du nombre comparé des nébuleuses de chaque côté, M. Abbe conclut que le rapport des distances est à peu près celui des nombres 4 et 27.

Maintenant, les nébuleuses et la Voie Lactée elle-même forment-elles un système unique, ou bien, y a-t-il autant de systèmes distincts que de nébuleuses? Ce sont là des questions que la science abordera peut-être fructueusement un jour, mais qu'il est bien difficile, sinon impossible aujourd'hui, de traiter et à plus forte raison de résoudre, sans sortir du pur domaine des conjectures[1].

1. D'intéressantes notes ont été publiées dans les journaux astronomiques, notamment dans les *Monthly notices*, sur ce problème de la structure de l'Univers, « the Structure of Heavens ». Mais une analyse, même très-abrégée de ces recherches, nous eût conduit trop loin. Nous renvoyons aux sources le lecteur désireux de les connaître.

II

STRUCTURE DE L'UNIVERS VISIBLE

§ 1. PREMIÈRES HYPOTHÈSES, DE GALILÉE A W. HERSCHEL (1785).

De grands esprits, des hommes d'une haute science et d'un génie élevé, ont cependant émis, depuis deux siècles, des vues d'une valeur incontestable sur la structure de l'Univers. A l'origine, la spéculation avait sans doute plus de part que la science, que les observations ou les faits, à ces grandioses hypothèses. Mais il n'en est pas moins intéressant d'en donner une idée, par un exposé rapide et sommaire; on verra ainsi quels progrès se sont accomplis, dans la manière de concevoir le monde, depuis deux cents ans.

C'est l'invention et l'application des lunettes à l'observation du ciel étoilé, qui fut et qui devait être le point de départ des spéculations de ce genre. Deux noms se présentent tout d'abord à nous, Galilée et Képler. Galilée se borne à exprimer l'importance de la découverte d'un grand nombre d'étoiles, jusqu'alors inconnues, nombre qui avait plus que décuplé celui des étoiles fixes observées à l'œil nu; il ajoute que ce n'est pas un faible avantage, que celui d'avoir montré aux sens la vraie nature de la Voie Lactée, et mis fin aux discussions qui s'élevaient à ce sujet.

Képler va plus loin que Galilée. Il conçoit le grand anneau

stellaire de la Voie Lactée et toutes les étoiles disséminées au dehors, comme un tout, un système, dont le Soleil, le cœur de l'Univers, occupe à peu près le centre. Les étoiles, moins éloignées les unes des autres que le Soleil n'est lui-même de chacune d'elles, remplissent tout l'espace compris entre deux sphères concentriques limitées intérieurement par un vide ou une concavité dont nous occupons le centre, extérieurement aussi par le vide. Nous avons déjà vu comment, en s'appuyant sur des spéculations harmoniques, le grand astronome était arrivé à évaluer la distance des étoiles les plus voisines. W. Struve fait observer avec raison, que les spéculations de Képler, quelque éloignées qu'elles soient des idées généralement admises aujourd'hui sur la structure de l'Univers, en contiennent cependant le premier germe.

Huygens, sans aborder ce grand problème, combat les idées de Képler sur les étoiles fixes, qu'il croit distribuées uniformément dans l'espace, et d'ailleurs aussi distantes les unes des autres qu'elles le sont du Soleil. Il généralise la conception du système solaire, assimile les étoiles au Soleil, et en fait les corps centraux d'autant de systèmes semblables.

Un demi-siècle s'écoule encore, et les idées se précisent en s'agrandissant. Pour Kant, les étoiles sont, comme pour Huygens, autant de systèmes solaires; mais ces systèmes ne sont pas isolés; ils sont liés par l'action mutuelle de la gravitation qui s'exerce dans l'universalité des cieux, et le grand philosophe conçoit la Voie Lactée elle-même comme un système d'un ordre supérieur, dont le plan principal joue le même rôle que le zodiaque dans le système planétaire. Poursuivant cette analogie, Kant pense que la Voie Lactée doit posséder, à son centre, un corps prépondérant qui est peut-être Sirius, corps jouant dans l'ensemble le rôle du Soleil dans le monde planétaire. Enfin, il y a, dans l'Univers, d'autres voies lactées que la nôtre; les nébuleuses de forme elliptique, que les télescopes sont impuissants à résoudre en étoiles, sont probable-

ment de tels systèmes, que leur immense éloignement réduit à d'aussi faibles dimensions apparentes. Les voies lactées sont elles-mêmes les membres de systèmes d'un ordre plus élevé.

Les idées de Lambert sur la structure de l'Univers ont beaucoup d'analogie avec celles de Kant. Cependant elles constituent un progrès. Pour lui, le Soleil et les étoiles sont bien autant de systèmes planétaires et cométaires; mais de ce premier ordre de dépendances, il ne passe point directement à la Voie Lactée. Le Soleil, avec les étoiles éparses, forme un amas sphérique; de pareils amas existent en grand nombre, tous rangés dans le plan principal de la zone galactique; la Voie Lactée, formée par cette accumulation d'amas stellaires, constitue donc un système du troisième ordre. Lambert passe ensuite aux systèmes de voies lactées, et ainsi de suite, le lien commun de tous ces systèmes étant la gravitation universelle.

Quand on songe au peu de données que l'observation avait recueillies à l'époque (1755) où Lambert émettait des vues d'une hardiesse si remarquable, on est frappé à la fois de la puissance de cet esprit et de l'exactitude relative de ses conceptions.

Jusque-là, les théories de la structure de l'Univers n'étaient basées que sur un petit nombre de faits d'observation, d'où l'on déduisait, par voie conjecturale, des vues plus ou moins arbitraires. Avec W. Herschel, la question fut abordée avec non moins de hardiesse, mais d'une façon beaucoup plus positive. D'immenses matériaux d'observations accumulées devraient être le point de départ des vues du grand astronome.

Dès 1785, Herschel formulait ces vues de la manière suivante. Deux hypothèses sont le fondement de ce premier système : la première consiste à admettre qu'en moyenne les étoiles sont uniformément distribuées dans l'espace, de sorte que si

l'Univers visible était sphérique, et avait le Soleil au centre (idée de Képler), la richesse stellaire serait la même dans toutes les directions. L'existence de la Voie Lactée détruit de toute évidence cette dernière supposition, de sorte que, dans tout le pourtour de cette zone, les dimensions de l'univers sont beaucoup plus étendues qu'ailleurs; une immense strate, à peu près cylindrique, d'étoiles, d'une épaisseur très-petite en comparaison de l'étendue diamétrale, constitue la Voie Lactée. Si l'hypothèse de l'égale distribution des étoiles est vraie, il est clair que le dénombrement stellaire à l'aide d'un télescope d'une suffisante puissance, fera reconnaître l'étendue du ciel dans les différents sens, et par conséquent déterminera, à la fois, les dimensions de la Voie Lactée et sa forme.

De là l'immense travail entrepris par Herschel, celui des *jaugeages* du ciel, des *jauges* d'étoiles, à l'aide du grand télescope de 20 pieds, dont le champ montrait seulement la 833 000ᵉ partie de la voûte céleste. C'est la zone comprise entre 45° de déclinaison boréale et 30° de déclinaison australe (à peu près les 5/8 du ciel) qu'il explora ainsi; mais il n'observa que 3400 champs (nombre énorme déjà), et en déduisit 683 jauges moyennes exprimant la densité stellaire des régions correspondantes. Cette densité variait considérablement : telle jauge donnait en moyenne moins d'une étoile, telle autre en fournissait près de 600; c'est-à-dire, dans l'hypothèse adoptée par Herschel, le rayon visuel s'étendait dans un cas jusqu'à une distance 46 (l'unité étant la moyenne distance de Sirius ou des étoiles de premier ordre), tandis que, dans l'autre, il atteignait 497 unités, près de 11 fois la première distance.

Le résultat de ces premières recherches fut que la Voie Lactée est un amas ramifié et très-étendu, contenant des millions d'étoiles, dont la section peut être représentée par la figure 344. On y voit que le lieu du Soleil se trouve à peu près au centre de gravité de la strate, les étoiles visibles à l'œil nu étant celles que réunirait un petit cercle tracé autour

du Soleil comme centre. Quant aux dimensions de la Voie Lactée, elles s'étendent en longueur jusqu'à 817 millions de rayons de l'orbite terrestre (de la Licorne à l'Aigle), tandis que l'épaisseur de la strate, dans le sens perpendiculaire (d'un pôle galactique à l'autre, ou de la Chevelure de Bérénice à la Baleine), serait 5 fois 1/2 moins grande, ou de 150 millions de rayons de l'orbite terrestre. Pour traverser cette épaisseur, d'outre en outre, la lumière met au moins 2300 ans; il



Fig. 344. Coupe de la Voie Lactée, d'après W. Herschel (système de 1785).

ne lui faut pas moins de 12 520 années pour franchir le plus grand diamètre de la nébuleuse.

Pour W. Herschel, les nébuleuses comme celles d'Orion, d'Andromède, sont des voies lactées; il évalue la distance de la seconde à 2000 fois la distance des étoiles de première grandeur; mais Struve fait observer avec raison que, si les dimensions de cette nébuleuse égalaient celles de la Voie Lactée, c'est à 6000 fois cette distance qu'elle serait reléguée dans l'espace. Il faudrait 97 000 ans à la lumière pour venir de telles profondeurs jusqu'à nous. Dans cette hypothèse, quand nos télescopes nous montrent la nébuleuse d'Andromède, c'est l'état de la nébuleuse, il y a 970 siècles, que nous contemplons !

§ 2. SECOND SYSTÈME DE W. HERSCHEL (1811-1818). — CONCLUSION.

Le système ou la théorie de W. Herschel, dont on vient de lire le résumé, repose sur les deux hypothèses de l'uniforme distribution des étoiles dans l'espace, et de la pénétration du télescope employé pour les jauges jusqu'aux limites de la Voie Lactée. Mais à partir de 1785, où le grand observateur formula ces vues, et jusqu'en 1818, de nouvelles études, des observations plus nombreuses, de nouvelles méditations le détournèrent peu à peu de sa première conception et finirent par la lui faire abandonner complétement. C'est dans cet intervalle que fut reconnue la liaison physique des couples d'étoiles, puis celle des étoiles des amas, et enfin la composition de la Voie Lactée elle-même, formée d'une multitude d'amas d'étoiles, plus ou moins régulièrement condensés. D'autre part, W. Herschel trouva qu'en plusieurs régions, le télescope de 20 pieds (front view) et même le télescope de 40 pieds, dont le pouvoir de pénétration atteignait jusqu'à 2300 fois la distance des étoiles de première grandeur, étaient cependant l'un et l'autre impuissants à résoudre la Voie Lactée en étoiles. La strate stellaire est donc insondable, ses limites ne peuvent être connues; et comme la nécessité de l'abandon de la première hypothèse ne permet plus de considérer les jauges, ou le degré de pauvreté ou de richesse stellaire, comme des indices ou des mesures de la distance, il fut obligé de reconnaître que les limites assignées à la Voie Lactée dans le système de 1785 étaient insuffisantes.

Pour base de ses nouvelles recherches, Herschel adopta alors le principe photométrique de l'égalité moyenne des éclats stellaires, dont il a été question quand nous avons parlé des distances relatives des étoiles de diverses grandeurs. Il étudia à ce point de vue la structure de la Voie Lactée, la distance proba-

ble des amas dont elle est formée et celle des amas extérieurs, reconnut que la portion de la strate stellaire la plus voisine du Soleil est celle qui traverse Orion, évalua son épaisseur, qu'il trouva dépasser de beaucoup l'étendue de la vue simple, et arriva à cette conséquence, que nous avons énoncée déjà, à savoir : « Que non-seulement notre Soleil, mais toutes les étoiles visibles à l'œil nu, sont profondément plongées dans la Voie Lactée et en font partie intégrante. »

Nous avons vu que W. Struve[1] reprit les recherches d'Herschel sur les distances des étoiles des divers ordres de grandeur, et modifia les nombres trouvés en tenant compte de l'extinction probable de la lumière dans l'espace. Malgré l'atténuation qui en résulte pour les distances, les conséquences déduites des analyses d'Herschel restent vraies dans leur énoncé général, et il en est de même de tout ce que nous avons dit des distances probables des amas stellaires et de toutes les nébuleuses résolubles.

Nous nous bornerons à cet exposé des données que la science est parvenue à réunir en combinant des milliers de laborieuses observations, sur le problème de la structure et des dimensions, non pas de l'Univers entier — ces dimensions sont inexprimables — mais de la portion de l'Univers que les télescopes nous ont fait connaître, et qui est seulement l'Univers visible. Tout n'est pas dit sans doute sur cette question grandiose, et, en ces derniers temps, divers savants ont cherché à pénétrer plus avant et à étendre les solutions ébauchées. Nous avons plus haut analysé quelques-unes de ces recher-

1. Ce savant astronome a évalué la distance du Soleil au plan principal de la Voie Lactée. On a vu plus haut que ce plan n'est pas un grand cercle de la sphère, mais un parallèle, ce qui prouve la position excentrique du Soleil dans le plan. Or, d'après Struve, cette distance est relativement faible. Elle n'est que la 119e partie de la distance des étoiles de 8e grandeur, les 21 centièmes de la distance des étoiles de la première grandeur, en un mot, égale environ à 208 000 rayons de l'orbite terrestre.

ches. Il nous suffira, pour terminer, de donner un court résumé qui permettra à chacun de nous de nous représenter l'Univers ainsi limité dans son majestueux ensemble.

Dans les profondeurs de l'espace sans bornes, existent de nombreuses agglomérations d'étoiles, qui sont comme les archipels de cet océan indéfini : la Voie Lactée est un de ces archipels, celui dont le système solaire ou plutôt l'amas qui contient ce système fait partie; le télescope en découvre un grand nombre de semblables sous la forme de nébuleuses. Chacune de ces voies lactées est elle-même formée d'une multitude d'amas, où les soleils se groupent comme en autant de systèmes, dont la condensation est plus prononcée que dans l'ensemble de la nébuleuse. Les étoiles sont les individus de ces associations de mondes, et notre Soleil ou notre étoile, ainsi que la plupart des étoiles visibles à l'œil nu, sont de simples composantes d'un amas stellaire plongé tout entier dans la Voie Lactée. Mais dans le sein de chacun de ces amas se trouve encore la tendance au groupement; et les étoiles doubles et multiples sont des systèmes plus simples de deux, de trois ou de plusieurs soleils gravitant les uns autour des autres.

Outre les amas stellaires, il existe d'autres grandes agglomérations, formées de matière non condensée, à l'état de gaz lumineux, ou encore à l'état de corpuscules solides ou liquides incandescents. Doit-on les considérer comme formant les matériaux de futures étoiles, ou bien comme les résidus de mondes en dissolution? Ces deux conjectures sont permises, ajoutons sont probables.

Là se bornerait ce qu'on peut savoir ou simplement conjecturer de la structure générale de l'univers visible, si nous ne faisions nous-mêmes partie d'un des plus simples de ces mondes solaires, si l'étude du système planétaire et de son organisation variée ne nous apprenait quel rôle peut jouer l'un de ces millions de corps célestes, qui se meuvent dans l'espace en projetant au loin leurs rayons de chaleur et de lumière. Nous

sommes induits à penser que chacun de ces groupes élémentaires se subdivise en groupes plus petits, en systèmes de corps qui gravitent autour d'un corps central, offrant le spectacle toujours merveilleux d'un monde en miniature : l'étude détaillée de ces mondes, de ces terres, satellites ou planètes, tels que les offre le système dont notre planète fait partie, donc dû précéder, dans notre description du ciel, celle des systèmes semblables de l'univers sidéral. Elle nous fournit en effet un terme de comparaison ; mais qui sait ce que nous révélerait l'étude des soleils qui peuplent l'étendue, s'il nous était donné de pénétrer dans la sphère d'action de chacun d'eux, et d'observer les phénomènes dont cette sphère est le théâtre? Nous y trouverions sans doute, en même temps que de frappantes analogies, des différences de composition, de mouvement, de structure des corps célestes qui les composent, et dont la connaissance du monde solaire est impuissante à nous donner l'idée. Mais, si l'imagination a le droit de former sur ce sujet toutes les conjectures, il n'en est pas de même de la science, dont la méthode sévère rejette, sans les condamner, les hypothèses qui n'ont point pour base les faits, l'observation et les conséquences tirées des faits par un raisonnement rigoureux.

Ici se termine la partie purement descriptive de notre tâche, celle qui avait pour objet de donner un tableau des phénomènes du ciel, d'après les connaissances astronomiques actuelles. Les phénomènes sont les matériaux de la science; la simple description peut en être attachante, surtout quand ils ont la grandeur des phénomènes astronomiques. Mais l'étude des lois auxquelles ils sont soumis, des causes physiques de ces lois, a pour tous ceux qui pensent, un attrait, un intérêt encore plus puissant, seul capable de satisfaire le besoin, la soif de connaître, qui est le plus noble des attributs de l'humanité. Je ne sais si je me trompe, mais j'espère que plus

d'un lecteur voudra pénétrer un peu plus avant, et ne sera point fâché de comprendre, autant qu'il est possible sans préparation scientifique préalable, les lois qui régissent les mouvements célestes et rendent raison des phénomènes les plus complexes, lois simples et sublimes, dont la conquête est pour les savants qui les ont reconnues et pour la raison humaine un éternel honneur ! Un exposé, même élémentaire, de ces lois, une explication raisonnée des principales théories astronomiques, des développements sur les méthodes usitées dans la science, sur les instruments et moyens d'observation, demanderaient plus d'espace qu'il ne nous en reste pour terminer un volume déjà considérable. Nous nous bornerons ici à un court appendice relatif à quelques particularités des phénomènes astronomiques qui auraient rompu le lien de notre description, si elles avaient été insérées dans les paragraphes correspondants. Mais nous nous réservons de publier ultérieurement une suite à notre ouvrage, un autre volume qui sera le complément du Ciel, et qui aura principalement pour objet l'exposé des lois et de la théorie.

TROISIÈME PARTIE

APPENDICE

TROISIÈME PARTIE

APPENDICE

I

LES CONSTELLATIONS

§ 1. CONSTELLATIONS VISIBLES SUR L'HORIZON DE PARIS. — ZONE CIRCOMPOLAIRE BORÉALE.

Avant d'étudier en eux-mêmes les phénomènes que présente le ciel étoilé, avant de pénétrer, comme nous venons de le faire, au cœur de l'univers visible, pour en saisir la structure merveilleuse et en embrasser par la pensée la prodigieuse étendue, il est bon de se familiariser avec les groupes d'étoiles, tels qu'ils se présentent à l'œil d'un habitant de la Terre. Les mouvements dont les étoiles prétendues fixes sont douées s'effectuant, ainsi que nous l'avons dit plus haut, avec une extrême lenteur, il en résulte que les groupes artificiels ou *constellations* affectent pendant des siècles les mêmes figures. Une telle constance de forme, jointe à la différence d'éclat des étoiles principales, donne à chaque constellation ou astérisme un aspect caractéristique qui va nous permettre de nous débrouiller au milieu du chaos de tant de points lumineux.

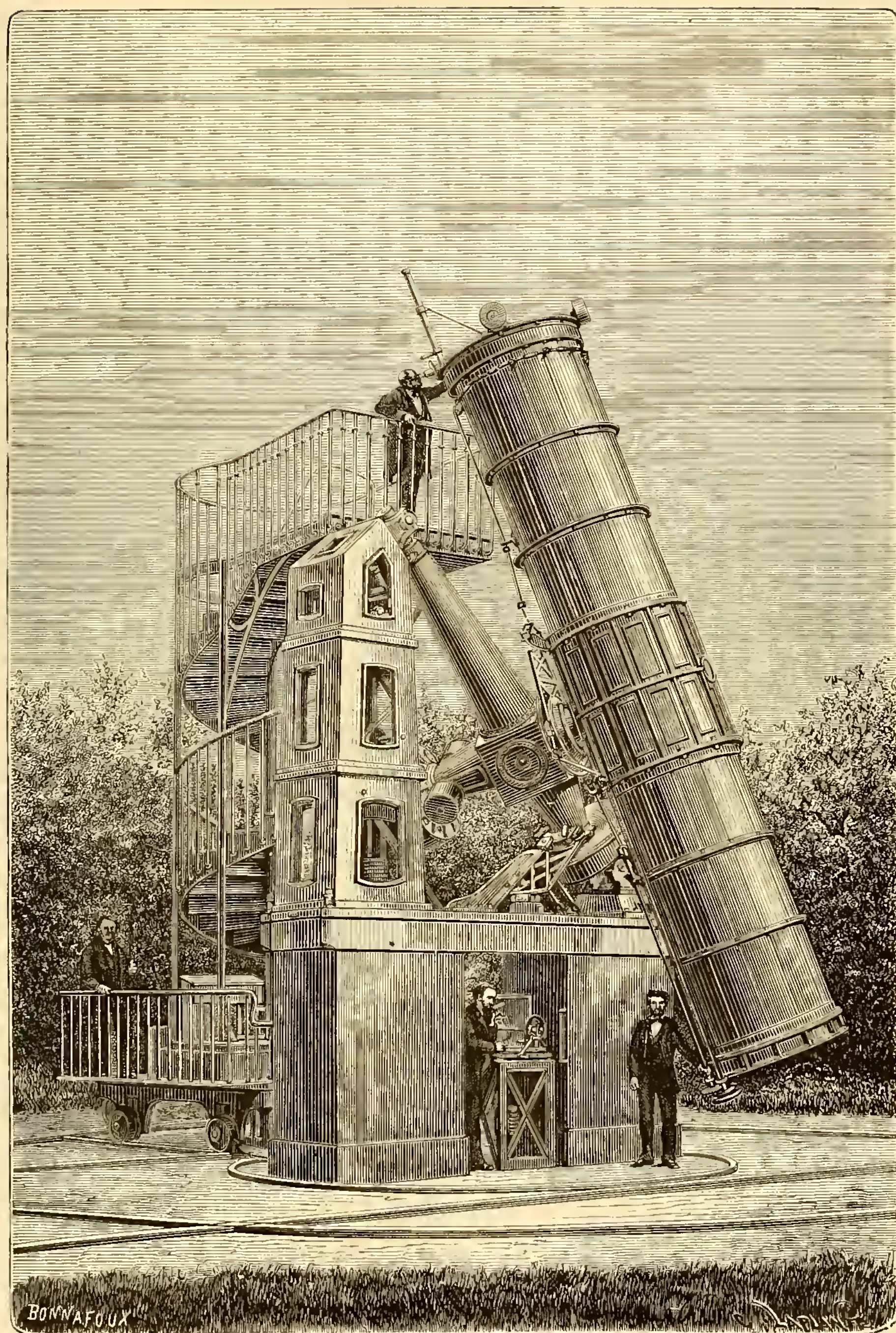
Choisissons, pour faire cette révision du ciel, une station quelconque à la surface de la Terre, par exemple l'horizon de Paris. Comme notre globe, en vertu du mouvement diurne, exécute en vingt-quatre heures environ une rotation entière autour de son axe, il en résulte que la

portion de la voûte céleste visible dans la station que nous avons choisie, défile entièrement devant nos yeux pendant le même temps. Il nous suffirait dès lors de vingt-quatre heures pour effectuer notre revue, si l'illumination de l'atmosphère n'effaçait les étoiles pendant le jour. Mais l'alternative du jour et de la nuit ne permet de voir qu'une portion des étoiles visibles en un lieu donné.

Heureusement, le mouvement de la Terre dans son orbite annuelle résout cette difficulté. En vertu de ce mouvement, chaque nuit vient nous montrer de nouvelles étoiles, tandis que d'autres d'abord visibles disparaissent. Dans le cours d'une année, la Terre présente ainsi successivement l'un quelconque de ses hémisphères obscurs à toutes les parties du ciel, à toutes celles du moins qui peuvent correspondre à l'horizon de l'observateur.

Enfin, il ne faut pas perdre de vue que, même dans cette hypothèse, toute une partie de la voûte céleste restera encore invisible. Il va suffire, pour s'en convaincre, de se rappeler quel est l'effet du mouvement diurne de rotation sur l'aspect du ciel en un lieu donné de la Terre, à Paris, je suppose. Un point situé à une certaine hauteur au-dessus de cet horizon, et au nord dans la direction du méridien, reste immobile C'est l'un des pôles. Puis, autour de ce point les étoiles semblent décrire, du levant au couchant, des cercles de plus en plus grands à mesure qu'elles sont plus éloignées du pôle. Tant que ces cercles ne vont pas atteindre l'horizon par leur arc inférieur, les étoiles ne se lèvent ni ne se couchent et restent constamment visibles : ce sont les étoiles *circompolaires*. Au delà, les cercles décrits plongent en partie au-dessous de l'horizon, grandissant jusqu'à un cercle limité qui est l'équateur. Puis, en s'éloignant encore, les étoiles décrivent des arcs de plus en plus courts, du côté du midi. Les dernières se lèvent à peine pour bientôt se coucher et disparaître. On conçoit donc qu'il reste toute une zone d'étoiles, lesquelles n'émergeant jamais au-dessus de l'horizon de Paris, sont à jamais invisibles pour tous les lieux de la Terre qui ont cette même latitude. Ce sont les étoiles qui environnent le pôle méridional du ciel, et qu'un observateur découvrirait peu à peu, à mesure qu'il descendrait en s'approchant des régions équatoriales de la Terre[1].

1. En vertu des deux mouvements de la Terre et de sa forme sphérique, la portion de la sphère céleste visible en un lieu quelconque du globe varie avec la latitude de ce lieu. A l'équateur, c'est le ciel tout entier, hémisphère boréal et hémisphère austral, qui défile devant l'observateur pendant les nuits d'une année entière. Les deux pôles sont couchés à l'horizon, dont ils marquent les points nord et sud ; l'équateur céleste va de l'est à l'ouest en passant par le zénith. A mesure qu'on s'avance de l'équateur vers l'un ou l'autre des pôles, la portion du ciel visible diminue, tout en dépassant la moitié. Enfin, aux pôles mêmes, on ne voit plus qu'une seule moitié du ciel, boréale ou australe, suivant les pôles. L'équateur céleste coïncide avec l'horizon lui-même, et le pôle céleste est au zénith.



LE GRAND TÉLESCOPE DE L'OBSERVATOIRE DE PARIS

Le ciel tout entier peut donc être considéré en chaque lieu, comme formé de trois zones : la première toujours visible pendant la nuit, quel que soit le jour de l'année, la seconde visible en partie seulement, la troisième toujours invisible.

Passons successivement en revue ces trois zones.

Occupons-nous d'abord de celle qui est toujours en vue, quand le ciel est clair bien entendu, pour tous les points de la Terre qui ont même latitude septentrionale que Paris (48° 50′). Toutes les constellations comprises dans cette zone d'étoiles circompolaires sont représentées dans la planche XXXIV. Essayons de les reconnaître.

Il est minuit, je suppose. Nous sommes à la fin de l'automne, vers le 20 décembre, pendant la nuit du solstice d'hiver. Orientons-nous, et cela fait, tournons nos regards vers le côté nord du ciel. Concevons par la pensée un cercle qui, rasant l'horizon au nord même, vienne se terminer un peu au delà du zénith[1], le centre de ce cercle idéal se trouvera à peu près à égale distance du zénith et de l'horizon : c'est le pôle céleste septentrional. Très-voisine de ce point (à 1° 24′), se trouve une étoile assez brillante, de seconde grandeur : on la nomme la *Polaire* Comme il est important de savoir retrouver cette étoile, dont la position reste à fort peu de chose près invariable dans tout le cours des nuits d'une année, j'indiquerai bientôt le moyen de la reconnaître.

Examinons vers la droite, sur la planche XXXIV (sur la carte céleste (pl. XL), ou dans la figure 345), un groupe de sept étoiles de seconde grandeur. Il appartient à une constellation du ciel boréal connue depuis longtemps sous le nom de la Grande-Ourse. Arrêtons-nous un instant en ce point du ciel, d'où nous partirons tout à l'heure pour opérer tous les alignements utiles à notre revue du ciel étoilé. Les sept étoiles que nous avons sous les yeux peuvent se décomposer en deux groupes, dont le premier, à la partie supérieure, figure un quadrilatère qu'on nomme le *corps de l'Ourse*, tandis que les trois étoiles inférieures forment la *queue*. Les deux étoiles extrêmes du quadrilatère se nomment les *gardes*[2]. Six des sept étoiles principales de cette constellation sont à peu près égales en éclat, et de seconde grandeur. Mais il est aisé de reconnaître à l'œil nu que l'étoile du corps de l'Ourse la plus voisine de la queue est inférieure aux autres : elle n'est plus guère aujourd'hui en effet que de quatrième grandeur, bien qu'au dix-septième siècle elle ne se distinguât point sous ce rapport de ses voisines. L'étoile du milieu du *timon* est accompagnée, vers la gauche, d'une toute petite étoile nommée *Alcor*, assez

1. Le zénith est, comme on sait, le point du ciel situé verticalement au-dessus de la tête d'un observateur.

2. La Grande-Ourse se nomme aussi vulgairement le *Chariot de David*. Alors les étoiles du quadrilatère en sont les *quatre roues*, tandis que les trois autres forment le *timon*.

facile à distinguer pour les vues moyennes[1]. L'œil nu peut apercevoir jusqu'à 138 étoiles dans la Grande-Ourse (d'après le catalogue d'Argelander; celui d'Heis en marque 227), parmi lesquelles, indépendamment des 7 principales, vous remarquerez 9 étoiles de troisième grandeur, 4 de quatrième; les autres forment les deux derniers ordres d'éclat perceptibles à la vue simple.

De la Grande-Ourse, revenons maintenant à l'étoile Polaire.

Prolongeons, pour cela, la ligne droite qui joint les Gardes, en nous approchant du centre de la portion du ciel qui est en vue. A une dis-



Fig. 345. Le ciel de l'horizon de Paris. Constellations circompolaires boréales.

tance d'environ cinq fois l'intervalle qui sépare ces deux étoiles, nous retrouvons la Polaire qui est aussi de seconde grandeur.

Nous savons que la Polaire joue actuellement un grand rôle dans le ciel boréal, puisque, très-voisine du pôle, cette étoile est pour ainsi dire l'un des pivots de l'axe idéal autour duquel la Terre exécute sa rotation diurne. Il en résulte qu'elle semble immobile, en conservant la même hauteur au-dessus d'un horizon quelconque, tandis que les autres étoiles décrivent autour d'elle des cercles d'inégale grandeur. Ainsi, la Grande-Ourse située d'abord à l'orient du pôle, à l'heure de minuit que nous avons choisie pour le début de notre inspection, va remonter vers le zénith à mesure que la nuit s'écoule. Vers six heures

1. Humboldt affirme n'avoir pu distinguer que rarement Alcor, à l'œil nu, sous le ciel d'Europe. Pour mon compte, je la vois sans difficulté et à toute époque, sous le ciel peu favorable de Paris.

du matin, elle sera au-dessus de la Polaire, tandis qu'à six heures du soir, elle occupait une position diamétralement opposée, au-dessous du pôle et près de l'horizon. Comme toutes les étoiles participent à ce mouvement d'ensemble, il est clair que leurs positions relatives ne sont pas changées, de sorte que les figures des groupes restent toujours les mêmes. Je fais une fois pour toutes cette remarque importante et je continue.

A l'ouest de la Polaire, à la même hauteur au-dessus de l'horizon que la Grande-Ourse, et à peu près la même distance du pôle, se trouve, à cette heure et à cette époque, un groupe de six étoiles dont deux sont de la seconde grandeur, deux de la troisième et deux de la quatrième : c'est la constellation de Cassiopée[1], qui renferme 67 étoiles visibles à l'œil nu (126 suivant Heis). Les six étoiles dont nous venons de parler forment une sorte de chaise renversée dont la figure, une fois bien comprise, rend cette constellation aisée à reconnaître.

Entre la Grande-Ourse et Cassiopée, se trouve la Petite-Ourse, dont la Polaire est l'étoile la plus brillante. Sur les 27 étoiles visibles à l'œil nu qui la composent (Heis en compte 54, le double), il y en a sept qui forment une figure ayant avec les sept étoiles de la Grande-Ourse une grande ressemblance, mais placée en sens inverse; les quatre étoiles intermédiaires se voient assez difficilement. Cette constellation ne renferme, outre la Polaire, qu'une étoile de deuxième grandeur et une de troisième; les 24 autres sont inférieures à la quatrième.

Au-dessous de la Petite-Ourse, on peut voir une série d'étoiles formant une ligne sinueuse, qui se prolonge jusque près des Gardes de la Grande-Ourse, et se termine à l'extrémité inférieure par un groupe de 4 étoiles rangées en trapèze. C'est le Dragon, qui, sur 130 étoiles visibles à l'œil nu (H. 220), en contient 1 seulement de deuxième grandeur et 9 de troisième. Céphée, la Girafe et le Lynx sont trois autres constellations voisines du pôle, comprenant ensemble 215 étoiles visibles à l'œil nu (H. 384). La première, entre la Petite-Ourse et Cassiopée; la deuxième, opposée au Dragon; la troisième, du même côté que la seconde. Elles n'offrent ni les unes ni les autres rien de bien remarquable, surtout la Girafe et le Lynx, dont les étoiles les plus brillantes sont au plus de troisième et de quatrième grandeur. Parmi toutes les étoiles qui, sur l'horizon de Paris, ne se couchent jamais, la plus brillante est une étoile de première grandeur connue sous le nom de la *Chèvre*, et qui fait partie de la constellation du Cocher. Vers le 20 décembre, à minuit, la Chèvre est à fort peu près au zénith, ainsi qu'on peut le voir

1. En tirant une ligne de l'étoile du milieu de la Grande-Ourse (la moins brillante des sept à la Polaire, et en la prolongeant d'une distance à peu près égale, on tombe presque sur l'étoile Bêta de Cassiopée.

dans la planche XXXIV. On peut trouver cette étoile remarquable, en prolongeant la ligne qui joint les deux étoiles du quadrilatère de la Grande-Ourse, les plus voisines du pôle. Le Cocher, qui renferme 69 étoiles visibles à l'œil nu (H. 144), contient, outre la Chèvre, 1 étoile de deuxième grandeur, 3 étoiles de troisième et 4 de quatrième grandeur.

Au nombre des constellations visibles au moins en partie pendant toute l'année, et dont les étoiles environnant le pôle ont reçu pour cette raison le nom d'*étoiles circompolaires*, il faut ranger Persée, qu'on aperçoit dans le voisinage du Cocher. Elle occupe à l'époque et à l'heure que nous avions choisies, une position un peu occidentale, relativement à cette dernière constellation, au-dessus de Cassiopée. Sur 81 étoiles visibles à l'œil nu (H. 136), 1 est de seconde grandeur, 4 sont de troisième et 14 de la quatrième grandeur. C'est dans Persée que se trouve l'étoile *Algol*, célèbre par les variations de sa lumière, qui la font passer alternativement et dans une très-courte période, de la seconde à la quatrième grandeur. Nous parlerons plus loin avec détail de cette singulière étoile.

J'ai supposé, pour décrire la zone circompolaire boréale, que nous étions au 20 décembre, à minuit. Mais il est facile de trouver, à l'aide de la même planche XXXIV, son aspect et sa position pour une heure quelconque de la nuit, ou pour une autre époque de l'année. C'est en vingt-quatre heures sidérales, en effet, que s'effectue la rotation entière du mouvement diurne : en six heures, un quart du mouvement total est donc accompli. Que résulte-t-il de là? Qu'une constellation telle que Cassiopée, par exemple, qui à minuit est à gauche du pôle, était au-dessus à six heures du soir et se retrouvera au-dessous, vers l'horizon, à six heures du matin. Dès lors, si l'on fait tourner la planche, de façon à mettre en bas, à l'horizon, chacun de ses quatre côtés, on aura les positions successives des étoiles de la zone circompolaire pour les heures suivantes :

Le 20 décembre :	côté horizontal inférieur......	à minuit;
	côté vertical de droite.........	à 6 h. du soir;
	côté horizontal supérieur.....	à midi;
	côté vertical de gauche.......	à 6 h. du matin.

A midi, tout le monde sait que les étoiles restent invisibles à cause de l'illumination de l'atmosphère. Les constellations et les étoiles n'en occupent pas moins, dans le ciel, la position indiquée dans le tableau ci-dessus. A l'aide d'un télescope ou d'une lunette astronomique d'une certaine puissance, on peut voir en plein jour les étoiles des ordres de grandeur, que la vue simple ne peut percevoir que la nuit. Ajoutons que, par une rotation lente de la figure, rien n'empêche de suivre progressivement la rotation de la voûte étoilée, à toutes les

heures de la nuit, intermédiaires entre celles que nous venons d'indiquer. D'un jour à l'autre, cet aspect changera, chaque étoile venant occuper de plus en plus tôt la même position que les nuits précédentes. Cette avance est de six heures tous les trois mois. Par conséquent, si l'on reprend dans le même ordre les quatre positions du tableau précédent, elles correspondent aux époques et aux heures suivantes de l'année :

	Le 22 mars.	Le 20 juin.	Le 22 septembre.
Côté horizontal inférieur..	6 h. du soir.	Midi.	6 h. du matin.
— vertical de droite....	Midi.	6 h. du mat.	Minuit.
— horizontal supérieur.	6 h. du mat.	Minuit.	6 h. du soir.
— vertical de gauche...	Minuit.	6 h. du soir.	Midi.

§ 2. CONSTELLATIONS VISIBLES AU SUD DE L'HORIZON DE PARIS. ÉTOILES DE LA ZONE ÉQUATORIALE.

Revenons maintenant à notre dénombrement des étoiles visibles à minuit, le 20 décembre.

Jetez les yeux sur la planche XXXV. Elle représente la voûte étoilée vue du côté du sud, telle qu'elle apparaîtra, si l'on tourne le dos à la zone circompolaire que nous venons de passer en revue. Cette zone immense embrasse à très-peu près la moitié de l'arc d'horizon qui va de l'Est à l'Ouest en passant par le point sud, et s'étend en hauteur jusque vers le zénith. Elle comprend les plus belles constellations, les étoiles les plus brillantes du ciel, et se trouve partagée en deux obliquement par la Voie Lactée.

Orion occupe à peu près le milieu du tableau. Cette magnifique constellation forme un grand quadrilatère, plus haut que large, au centre duquel on aperçoit trois étoiles de seconde grandeur rangées obliquement en ligne droite et bien connues sous le nom populaire du *Râteau* ou des *Trois-Rois*, ou encore du *Bâton de Jacob*. Deux des étoiles du grand quadrilatère sont de première grandeur. On les nomme *Betelgeuse* et *Rigel*. Betelgeuse, dont l'éclat varie périodiquement, est remarquable par la teinte rougeâtre de sa lumière. Sur 115 étoiles visibles à l'œil nu (H. 136), outre les deux plus brillantes, Orion renferme encore 4 étoiles de deuxième grandeur, 4 de troisième et 6 de quatrième grandeur.

En prolongeant vers le Nord-Ouest la ligne des trois étoiles du *Baudrier d'Orion* — c'est encore un nom donné au Râteau — l'œil passe près d'une étoile rouge de première grandeur : c'est *Aldébaran*, la plus brillante de la constellation du Taureau. Aldébaran est au milieu d'un groupe de petites étoiles qu'on nomme les *Hyades*. Un peu plus loin dans la même direction, on aperçoit les *Pléiades*, si faciles à recon-

naître au milieu du ciel par l'entassement des six étoiles visibles à l'œil nu qui composent ce groupe intéressant. Le Taureau ne contient pas moins de 121 étoiles (H. 188), 1 de première, 1 de seconde, 3 de troisième et 14 de quatrième grandeur.

Si maintenant vous prolongez, vers le sud-est d'Orion, la ligne qui nous a donné Aldébaran au Nord-Ouest, vous allez rencontrer sur le bord de la Voie Lactée la constellation du Grand-Chien, qui renferme *Sirius*, la plus brillante étoile des deux hémisphères, la plus remarquable par la vivacité de sa scintillation et par son éclatante blancheur. Sur 66 étoiles (H. 70) visibles à l'œil nu dont cette constellation est formée, 2 étoiles appartiennent à la seconde grandeur et 4 à la troisième.



Fig. 346. Le ciel de l'horizon de Paris. Zone équatoriale : Orion, le Taureau, le Grand-Chien.

Vers l'Ouest, et en ce moment à peu près à la même hauteur que Betelgeuse, brille *Procyon*, de l'autre côté de la Voie Lactée. C'est une étoile de première grandeur, la plus brillante de la constellation du Petit-Chien. Il importe de remarquer que Betelgeuse, Sirius et Procyon forment un triangle dont les trois côtés sont presque de même longueur apparente (fig. 346). Cette circonstance permet encore de retrouver aisément ces étoiles.

Au-dessus de Procyon et en remontant vers le zénith, *Castor* et *Pollux*, qui brillent à cinq degrés seulement de distance apparente, nous indiquent les Gémeaux, constellation renfermant outre ces deux étoiles, l'une de première et l'autre de seconde grandeur, 51 étoiles visibles à l'œil nu (H. 106). Vers l'Occident et à côté des Pléiades, vous voyez la constellation du Bélier, et un peu au-dessous, celles de la Baleine et de

l'Éridan, qui ne renferment pas, dans la portion du ciel visible sur l'horizon de Paris, d'étoiles de première grandeur.

Mais à mesure que nous énumérons et contemplons cette partie si brillante du ciel, les étoiles défilent entraînées par le mouvement diurne; les unes se couchent et disparaissent à l'Occident, tandis que les autres s'élèvent à l'Orient, nous permettant ainsi d'apercevoir des constellations nouvelles. Avant de les passer en revue, disons que l'horizon du Sud représenté par la planche XXXV offre le même aspect aux époques et aux heures suivantes :

A minuit.............	le 20 décembre.
A 6 heures du soir.....	le 22 mars.
A midi................	le 20 juin.
A 6 heures du matin...	le 22 septembre.

Du 20 décembre, date du solstice d'hiver, au 22 mars, c'est-à-dire à l'équinoxe du printemps, la Terre se déplace peu à peu dans son orbite, de sorte que la partie du ciel opposée au Soleil change progressivement. Par ce mouvement, nous verrions successivement pendant ces trois mois de la saison d'hiver, et aux mêmes heures de la nuit, des constellations de plus en plus orientales.

Il résulte de ce mouvement progressif apparent, dû au mouvement réel de translation de la Terre autour du Soleil, que le 22 mars, à minuit, le tableau de la voûte étoilée du côté du Sud aura presque complétement changé : au lieu d'Orion, qui vient alors de se coucher, c'es le Lion qui en occupe le centre. Le ciel offre alors, au sud de l'horizon de Paris, l'aspect de la planche XXXVI. La Voie Lactée s'est inclinée à l'Occident et rase l'horizon en remontant du côté du Nord.

Les principales étoiles du Lion forment une espèce de trapèze surmonté du côté du couchant par un demi-cercle en forme de faucille. C'est à l'extrémité inférieure du manche de l'instrument que brille *Régulus*, étoile de première grandeur, qu'on nomme aussi le *Cœur* du Lion. *Denebola* est l'étoile située à l'autre extrémité du trapèze. Sur 75 étoiles visibles à l'œil nu (H. 161) dans cette constellation sans compter Régulus, il y en a 2 de seconde grandeur, 5 de troisième et 8 de quatrième.

Trois étoiles de premier ordre brillent encore en ce moment avec Régulus dans la zone céleste qui est sous nos yeux. C'est vers le Sud-Ouest, Procyon, qui n'est pas encore couché ; puis, à la même hauteur que cette étoile, et plus à l'est que le Lion, l'*Épi* de la Vierge, qui ne tardera pas à passer au méridien ; enfin *Arcturus*, la plus brillante de la constellation du Bouvier, qu'on peut reconnaître en prolongeant jusqu'à leur point d'intersection les deux bases les plus grandes du trapèze de la Grande-Ourse. L'Épi, Arcturus et Denebola du Lion forment

aussi les sommets d'un triangle dont les côtés sont presque égaux, et dont la base, à peu près parallèle à l'horizon à cette heure, est la ligne qui joint les deux dernières étoiles (fig. 347). La Vierge et le Bouvier sont, avec le Lion, les plus importantes constellations actuellement en vue. La première contient 100, la seconde 85 étoiles visibles à l'œil nu (d'après Heis, 181 et 140) ; 11 étoiles de la Vierge et 18 étoiles du Bouvier dépassent en éclat la 4e grandeur.

Entre le Lion et le Bouvier, on remarque un amas de 39 (H. 70) petites étoiles très-rapprochées, et, par cela même, impossibles à distinguer nettement les unes des autres : c'est la Chevelure de Bérénice. A l'est d'Arcturus, 6 étoiles rangées en demi-cercle et dont la plus



Fig. 347. Le ciel de l'horizon de Paris. Zone équatoriale : le Lion, la Vierge, l'Hydre.

brillante se nomme la *Perle*, forment la Couronne Boréale, au-dessous de laquelle se trouvent la *Tête* du Serpent et Ophiucus. De chaque côté de l'Épi et un peu au-dessous près de l'horizon, on distingue la Balance, le Corbeau et la Coupe. Les deux premières constellations renferment seules quelques étoiles de seconde grandeur. Enfin, sur l'horizon apparaissent, dans les brumes, un petit nombre d'étoiles du Scorpion et du Centaure, constellations que nous retrouverons et décrirons plus au complet dans le ciel de juin ou dans la zone céleste environnant le pôle austral.

Pour terminer l'examen des constellations visibles le 22 mars à minuit, signalons les Chiens de chasse (on dit aussi les Lévriers) au-dessus de la Chevelure de Bérénice, le Petit-Lion au-dessus du Lion, le Cancer ou l'Écrevisse à l'occident de Régulus ; et enfin, tout près de

l'horizon et de la Voie Lactée, l'Hydre où brille le *Cœur*, étoile variable de second ordre, et la Licorne au-dessus de Procyon. Ces cinq constellations comprennent 363 étoiles d'après Argelander, et 485 d'après Heis.

La zone que nous venons de décrire occupe, sur l'horizon et à la latitude de Paris, la même position aux époques et aux heures suivantes :

Le 22 mars...........	à minuit;
Le 20 juin............	à 5 heures du soir[1];
Le 22 septembre.......	à midi;
Le 20 décembre.......	à 6 heures du matin.

Le 20 juin, à minuit, c'est-à-dire à l'époque du solstice d'été, c'est une autre partie de la zone équatoriale qui va défiler sous nos yeux.



Fig. 348. Le ciel de l'horizon de Paris. Zone équatoriale : Bouvier, Chevelure de Bérénice, Couronne boréale, Hercule.

Tournons-nous toujours vers le Sud : l'aspect du ciel sera celui que représente la planche XXXVII. La Couronne boréale et le Bouvier, le Serpent, la Balance et la Vierge qui, le 22 mars, occupaient la partie orientale de la voûte étoilée, sont maintenant à l'Occident. Arcturus est situé verticalement au-dessus de l'Épi. La Voie Lactée, divisée en deux grandes branches, s'élève obliquement de l'horizon méridien ou du Sud vers le Nord-Est.

Trois étoiles de première grandeur brillent à des hauteurs inégales

1. Il faut faire ici, pour le 20 juin, une remarque analogue à celle déjà exprimée plus haut pour l'heure de midi. A six heures du soir en été, l'éclat de l'atmosphère rend les étoiles invisibles à l'œil nu.

dans trois constellations différentes. Ce sont, en allant de l'Occident à l'Orient, *Antarès* ou le *Cœur* du Scorpion, qui s'élève à peine au-dessus de l'horizon sur le bord de la Voie Lactée. Vient ensuite *Wéga* de la Lyre qui touche presque au zénith, et enfin, à une hauteur environ moitié moindre, *Ataïr*, la plus brillante étoile de l'Aigle.

Quelques mots maintenant sur les constellations en vue.

C'est d'abord, à l'ouest de la Couronne boréale, et s'élevant jusqu'au zénith, Hercule, qui sur un nombre total de 155 étoiles visibles à l'œil nu (H. 227) n'en renferme que 2 approchant de la seconde grandeur et 14 entre la troisième et la cinquième. C'est vers un point de cette constellation, nous l'avons vu, que se dirige actuellement notre



Fig. 349. Le ciel de l'horizon de Paris. Zone équatoriale : le Cygne, la Lyre, l'Aigle.

Soleil, emportant avec lui tout son monde de planètes, de satellites et de comètes. A l'orient d'Hercule est la Lyre (étoiles vis. à l'œil nu, A. 48, H. 69), où nous avons déjà distingué la brillante et blanche Wéga, aisée à reconnaître par le voisinage de quatre étoiles formant au-dessous d'elle un petit parallélogramme.

En allant toujours vers l'Orient, on rencontre à gauche de la Lyre la constellation du Cygne (étoiles, A. 145, H. 197), qui traverse la Voie Lactée et dont l'étoile la plus brillante, *Alpha*, est entre la seconde et la première grandeur. Cette étoile forme, avec quatre autres de troisième ordre, une grande croix qui est à cette heure inclinée à l'horizon, et sert à distinguer la constellation à laquelle elles appartiennent. Alpha du Cygne forme aussi, avec Ataïr et Wéga, un grand triangle isocèle. Dans le Cygne se trouve une petite étoile, à peine

visible à l'œil nu, mais qui est célèbre dans les annales astronomiques : c'est la première dont la distance à la Terre ait été mesurée. Le Cygne ne contient pas moins de 145 étoiles perceptibles à la vue simple ; mais 22 seulement surpassent la cinquième grandeur. Le Renard, la Flèche, le Dauphin, entre la Lyre, le Cygne et l'Aigle, n'offrent aucune étoile remarquable. En se rapprochant de l'horizon et toujours vers l'Orient, on aperçoit les constellations du Verseau et du Capricorne ; puis, en partie dans la Voie Lactée, le Sagittaire. Là nous retrouvons les étoiles du Scorpion, parmi lesquelles Antarès, qui bientôt disparaîtra sous l'horizon, ainsi que les quatre étoiles avec lesquelles il forme une sorte d'éventail. Au-dessus du Scorpion, Ophiucus et le Serpent sont entière-



Fig. 350. Le ciel de l'horizon de Paris. Zone équatoriale : Pégase, Andromède, Persée.

ment visibles. On y distingue 4 étoiles de seconde grandeur et 27 de la seconde à la cinquième.

Là se termine notre révision de la zone équatoriale pour le milieu de la nuit du solstice d'été, zone qui présente la même position aux quatre époques principales suivantes :

Le 20 juin	à minuit ;
Le 22 septembre.......	à 6 heures du soir ;
Le 20 décembre	à midi ;
Le 22 mars	à 6 heures du matin.

Il ne nous reste plus pour achever cette description des étoiles visibles au-dessus de l'horizon de Paris, qu'à passer en revue les constellations de la zone équatoriale, telles qu'elles apparaissent au milieu de la nuit de l'équinoxe d'automne.

Nous sommes au 22 septembre, à minuit. Les yeux tournés vers le Sud, nous embrassons du regard toute la partie du ciel qui s'étend de l'Ouest à l'Est jusqu'au zénith. La planche XXXVIII reproduit l'aspect de la voûte céleste, à cette heure et à cette époque de l'année.

A l'Occident apparaît Ataïr, dans l'Aigle, et plus haut le Cygne; à l'Orient, les Pléiades, le Taureau où brille Aldébaran. Orion déjà visible va bientôt monter sur l'horizon. Nous avons fait, on le voit, de décembre à septembre, les trois quarts du tour du ciel; ou plutôt la voûte étoilée tout entière, si nous y joignons les étoiles actuellement visibles, aura défilé sous nos yeux.

Vers le milieu du ciel, un peu plus rapproché du zénith que de l'horizon, se dessine un grand carré de quatre étoiles, dont trois sont de seconde et une de troisième grandeur. A la suite et du côté de l'Orient, trois autres étoiles de seconde grandeur et pareillement espacées font, avec le carré dont nous parlons, une figure beaucoup plus étendue, mais ayant beaucoup de ressemblance avec le groupe des sept étoiles principales de la Grande-Ourse. De ces sept étoiles, trois appartiennent à la constellation de PÉGASE, trois à celle d'ANDROMÈDE, et la plus orientale enfin n'est autre qu'Algol, la variable de Persée. Andromède et Pégase renferment, à elles deux, 191 étoiles visibles à l'œil nu (H. 317), parmi lesquelles 12 seulement surpassent la quatrième grandeur. Entre le *carré de Pégase* et le Taureau, on rencontre deux constellations : les POISSONS, le BÉLIER. Cette dernière seule renferme deux étoiles assez brillantes, situées à peu près à égale distance des Pléiades et des deux étoiles orientales du carré de Pégase.

Au-dessous des Poissons et du Bélier est la BALEINE, dont les étoiles plongent jusqu'au-dessous de l'horizon. Sur 98 étoiles visibles à l'œil nu (H. 162), cette constellation en renferme 6 de troisième grandeur et 2 de seconde; on y distingue en outre une étoile fort remarquable par les variations périodiques de son éclat, qui tantôt augmente jusqu'à la faire voir sous l'aspect d'une étoile de quatrième grandeur et tantôt s'efface assez pour la rendre invisible : c'est *Mira* ou o de la Baleine. Nous avons décrit ces phénomènes de variabilité d'éclat.

A l'Occident de cette constellation, nous retrouverons le VERSEAU et le CAPRICORNE; puis, tout à fait au Sud et rasant l'horizon, les étoiles du POISSON AUSTRAL, parmi lesquelles on peut distinguer, si l'atmosphère est pure et si les objets terrestres ne lui servent pas de voile, *Fomalhaut*, belle étoile de première grandeur.

La quatrième partie de la zone équatoriale qu'on vient de passer en revue offre le même aspect aux époques et aux heures suivantes :

Le 22 septembre.......	à minuit;
Le 20 décembre.......	à 6 heures du soir;

Le 22 mars.......... à midi;
Le 20 juin............ à 6 heures du matin.

Disons, pour terminer cette revue rapide du ciel méridional de l'horizon de Paris, que les quatre planches qui nous ont aidé à reconnaître les diverses constellations peuvent encore servir à d'autres époques de l'année et à d'autres heures de la nuit. Seulement, les groupes d'étoiles, tout en conservant les mêmes positions relatives, seront diversement inclinés sur l'horizon. Plus l'heure sera avancée au delà de minuit, plus il y aura d'étoiles occidentales disparues, plus on verra de nouvelles étoiles à l'Orient. Ce changement qui provient du mouvement diurne se produira de la même façon, si l'on passe d'un jour à l'autre, d'un mois au mois suivant, de sorte qu'à la même heure de la nuit, les étoiles visibles en un même point du ciel appartiennent à des constellations de plus en plus orientales. Nous avons déjà dit que ce second mouvement apparent de la voûte étoilée est dû à la translation de la Terre dans son orbite.

§ 3. ZONE CIRCOMPOLAIRE AUSTRALE. — ÉTOILES INVISIBLES SUR L'HORIZON DE PARIS.

De l'hémisphère boréal de la Terre, où nous nous sommes placés jusqu'à présent pour observer la voûte étoilée, transportons-nous dans l'hémisphère austral. Choisissons un lieu dont la distance à l'Équateur soit précisément la même que celle de notre premier poste, c'est-à-dire situé sur le parallèle qui passe par les antipodes de Paris. Supposons-nous placés en un point des côtes de Patagonie, par exemple, près de la pointe sud de l'Amérique méridionale. Là, toutes les étoiles formant la zone circompolaire boréale, et qui sur le parallèle de Paris ne se couchent jamais, seront constamment invisibles. En regardant du côté de l'Équateur, c'est-à-dire vers le Nord, on verra défiler, d'un bout de l'année à l'autre, toutes les constellations de la zone équatoriale que nous venons de décrire. Mais les étoiles s'y trouveront disposées dans un ordre tout à fait inverse, du moins relativement à l'horizon; de sorte que les deux étoiles du grand quadrilatère d'Orion, je suppose, qui à Paris en forment la base inférieure, apparaîtront à la partie supérieure; Sirius, qui se montre dans l'hémisphère nord, à gauche et au-dessous d'Orion, s'y trouvera à droite et plus élevé sur l'horizon. Ce changement d'aspect s'explique aisément par le changement complet de position de l'observateur.

Mais si nous jetons les yeux du côté du Sud, nous allons pouvoir contempler toute une série d'étoiles inconnues à la zone terrestre qui

s'étend du parallèle de Paris jusqu'au pôle septentrional. Ce sont les constellations qui environnent le pôle austral du ciel, et qui ne se couchent jamais sur notre nouvel horizon. Si donc nous passons maintenant en revue cette nouvelle zone d'étoiles, nous aurons terminé la description de la voûte céleste tout entière.

Revenons à la nuit du 20 décembre, celle de notre solstice d'hiver qui est le commencement de la saison chaude ou le solstice d'été pour l'hémisphère austral. Il est minuit, et la planche XXXIX représente l'aspect de la voûte étoilée à cette heure et à cette époque.



Fig. 351. Étoiles invisibles sur l'horizon de Paris. Zone circompolaire australe : Navire, Croix du Sud, Centaure.

La Voie Lactée, ramifiée en diverses branches, s'élève légèrement inclinée sur l'horizon à gauche, c'est-à-dire du côté de l'Orient. Mais ce qui frappe tout d'abord dans le tableau de la partie du ciel que nous examinons, c'est la multitude de brillantes étoiles qui suivent le cours de la Voie Lactée jusqu'au zénith, et qui, passant par-dessus notre tête, vont derrière nous rejoindre Sirius, Procyon, Aldébaran, jusque près de l'horizon du Nord. Commençons par les constellations qui composent cette zone éclatante

A peu près à la hauteur du pôle, ou, si l'on veut, à égale distance de l'horizon et du zénith, quatre étoiles, dont une est de première et deux de seconde grandeur, forment un losange allongé et couché parallèlement à l'horizon. Ce sont les principales étoiles de la Croix du Sud. Au-dessous de la plus brillante de la Croix, et entre deux branches de la Voie Lactée, deux étoiles de premier ordre distinguent la grande constellation du Centaure, où l'œil aperçoit encore cinq étoiles de se-

conde grandeur. Le Centaure s'étend à l'orient et au nord de la Croix, qu'il enveloppe presque entièrement. On a vu que la plus brillante étoile de cette constellation n'est pas seulement remarquable par son éclat; elle forme un système de deux soleils, se mouvant l'un autour de l'autre: c'est aussi la plus rapprochée de nous parmi les étoiles dont on a pu mesurer la distance à la Terre.

Au-dessous du Centaure et vers l'horizon, apparaissent un assez grand nombre d'étoiles de troisième et de quatrième grandeur, qui forment la constellation du Loup. Un rameau détaché de la Voie Lactée



Fig. 352. Étoiles invisibles sur l'horizon de Paris. Zone circompolaire australe : le Navire, la Croix du Sud.

traverse le Loup et va se perdre dans le Scorpion, dont quelques étoiles seulement s'élèvent à cette heure au-dessus de l'horizon.

L'Autel et le Triangle austral, qui longent la Voie Lactée en remontant vers le pôle, et où nous n'avons rien à signaler de remarquable, vont nous ramener au-dessus de la Croix, dans la magnifique constellation du Navire ou d'Argo. Là, une multitude de brillantes étoiles rangées autour du pôle en zone circulaire, donnent à cette région du ciel une splendeur incomparable. *Canopus*, considérée jadis comme la plus éclatante de toute la voûte céleste après Sirius, et qu'une autre étoile du Navire a fait quelque temps déchoir de son rang, est, à cette heure, voisine du zénith et presque dans le méridien; tandis qu'au-dessus d'Alpha de la Croix, se trouve η du Navire, qui étonnait le regard, il y a peu d'années encore, par sa magnificence insolite.

Du Navire, nous passons, sans rencontrer aucune constellation remarquable, par le Poisson volant, la Dorade, le Réticule, et nous

arrivons à l'Eridan, dont nous avons observé déjà la partie visible dans le ciel de Paris. C'est à l'extrémité de cette constellation la plus voisine du pôle que brille *Achernar*, belle étoile de première grandeur. A droite d'Achernar, trois étoiles, l'une de second, les deux autres de troisième ordre, forment le Phénix, au-dessous duquel en revenant à l'horizon et au méridien on trouve le Toucan et la Grue, l'Indien et le Paon. Deux étoiles de seconde grandeur et quelques-unes de troisième distinguent ces constellations, dont on peut reconnaître exactement la position dans les figures 351 et 353.

Dans cette énumération des constellations circompolaires du pôle

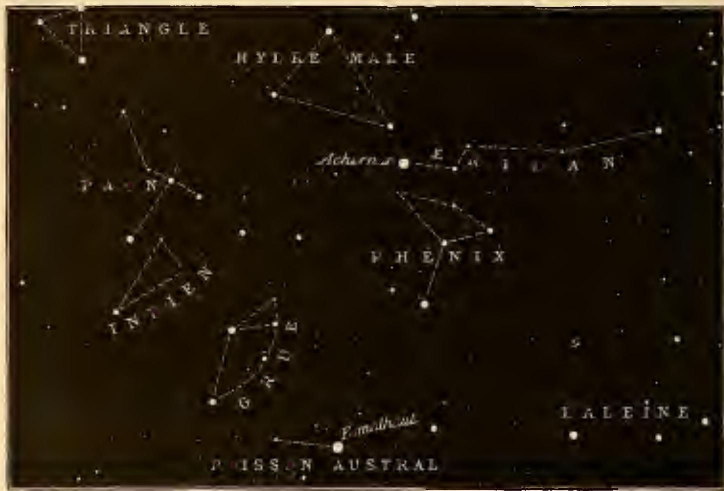


Fig. 353. Étoiles invisibles sur l'horizon de Paris. Zone circompolaire australe : Éridan, Phénix, Grue, Paon, Indien.

sud, nous n'avons rien dit des étoiles situées près de ce pôle même. La raison en est simple. Aucune d'elles ne mérite une mention et, sauf l'étoile β de l'Hydre, n'approche de la troisième grandeur. Il n'y a donc pas, dans le ciel austral, d'étoile analogue à la *Polaire* du ciel boréal. Cette pauvreté des régions polaires est singulièrement compensée par le nombre et l'éclat des étoiles qui entourent toute la zone australe. Ajoutons qu'en dehors de la Voie Lactée et dans le voisinage des parties les moins brillantes de la zone, se voient le Grand-Nuage et le Petit-Nuage, les deux Nuées de Magellan dont nous avons donné une description détaillée.

II

ÉCLIPSES DE SOLEIL ET DE LUNE

§ 1. THÉORIE GÉNÉRALE DES ÉCLIPSES.

Lorsque les mouvements de la Lune et de la Terre amènent ces deux astres dans une position telle, que leurs centres sont en ligne droite avec le centre du Soleil, le phénomène qui résulte de cette situation particulière des trois corps célestes, est ce qu'on nomme une *Éclipse*. Si c'est la Lune qui occupe la station intermédiaire, elle tourne vers la Terre son hémisphère obscur; l'interposition de ce disque noir devant le disque lumineux du Soleil empêche les rayons d'arriver jusqu'à nous : il y a *Éclipse de Soleil*. Si c'est la Terre même qui se trouve entre le Soleil et la Lune, notre globe remplit pour cette dernière la fonction d'écran. L'hémisphère lunaire tourné vers nous ne reçoit plus les rayons du Soleil, et son disque momentanément obscurci nous donne une *Éclipse de Lune*. Mais cette manière d'envisager le phénomène est relative à la Terre seule. En réalité, dans ces deux circonstances, il y a simultanément éclipse pour chacun des trois astres en question, comme il est aisé de s'en rendre compte.

Qu'arrive-t-il, en effet, dans le premier cas?

Pour un observateur placé sur le Soleil, la Lune paraîtrait projetée sur la Terre, dont elle masquerait une partie de la surface. Il est vrai que les deux disques superposés, lumineux tous deux, ne laisseraient voir aucun obscurcissement sur la surface du globe terrestre[1]. Pour un observateur placé dans l'hémisphère obscur de la Lune, il y aura éclipse de Terre, c'est-à-dire obscurcissement successif de toute une série de

1. Un phénomène de ce genre est celui dont nous pouvons être témoin à la surface de la Terre, et qui nous fait voir un des satellites de Jupiter ou de Saturne se projetant sous la forme d'un disque lumineux, sur le disque éclairé de la planète elle-même.

régions de notre globe, qui ont alors éclipse de Soleil. Enfin, dans le cas d'une éclipse de Lune pour la Terre, il y a aussi éclipse de Lune pour le Soleil, tandis que c'est une éclipse de Soleil pour l'hémisphère lunaire tourné vers nous.

Les éclipses peuvent être encore envisagées et expliquées d'une autre façon. La Terre et la Lune sont deux corps sphériques, opaques, dont une moitié est constamment éclairée par les rayons du Soleil, tandis que l'autre moitié est dans l'ombre. Le corps éclairant est lui-même une sphère de dimensions beaucoup plus considérables. Non-seulement la Lune et la Terre ont toujours un de leurs hémisphères obscur, mais encore chacun de ces deux astres projette derrière lui, c'est-à-dire à l'opposé du Soleil, une ombre en forme de cône, dont la longueur et l'épaisseur dépendent de la distance du corps éclairant et du diamètre du corps éclairé. Ce cône d'ombre contient tous les points de l'espace qui, à cause de l'interposition du corps opaque, ne reçoivent du Soleil aucun rayon de lumière. Au delà du sommet de ce cône d'ombre pure et dans son prolongement, se trouvent tous les points de l'espace qui voient une partie du Soleil, sous la forme d'un anneau lumineux débordant le disque obscur du corps opaque. Enfin, ces deux régions sont elles-mêmes environnées de ce qu'on nomme la pénombre. Tout point de l'espace situé dans la pénombre ne reçoit de lumière que d'une partie du Soleil, dont le disque lumineux paraît échancré par le disque obscur du corps opaque. L'obscurcissement produit par la pénombre est d'autant plus intense, que le point dont il s'agit est plus voisin de l'ombre pure. La Lune et la Terre, dans leurs mouvements, emportent avec elles leurs cônes d'ombre et de pénombre, et c'est en les projetant l'une sur l'autre qu'elles produisent les phénomènes des éclipses.

C'est là une théorie des plus simples, que tout le monde comprend aujourd'hui, et que j'ai rapidement résumée pour donner plus de clarté aux détails qui vont suivre.

Maintenant, qu'on jette les yeux sur la figure 354, et l'on verra tout de suite qu'une éclipse de Soleil a toujours lieu au moment de la Lune nouvelle, et qu'une éclipse de Lune n'est possible, au contraire, qu'à l'époque où notre satellite est en opposition, c'est-à-dire pendant la pleine Lune. Dans toutes les autres positions de notre satellite, c'est-à-dire pour tous les autres phases de lunaison, le cône d'ombre lunaire se projette dans l'espace sans atteindre la Terre, et le cône d'ombre terrestre prolongé ne rencontre pas non plus la Lune. C'est ce que confirment toutes les observations d'éclipses. Maintenant, il ne suit pas de là qu'il y ait éclipse à chaque pleine Lune, à chaque Lune nouvelle : la raison en est aisée à comprendre. Il y aurait réellement deux éclipses dans chaque mois lunaire, l'une de Soleil, l'autre de Lune, si l'orbite de

la Terre autour du Soleil et l'orbite de la Lune autour de la Terre étaient décrites dans le même plan. Alors, à l'époque soit de l'opposition soit de la conjonction, les centres des trois astres seraient nécessairement en

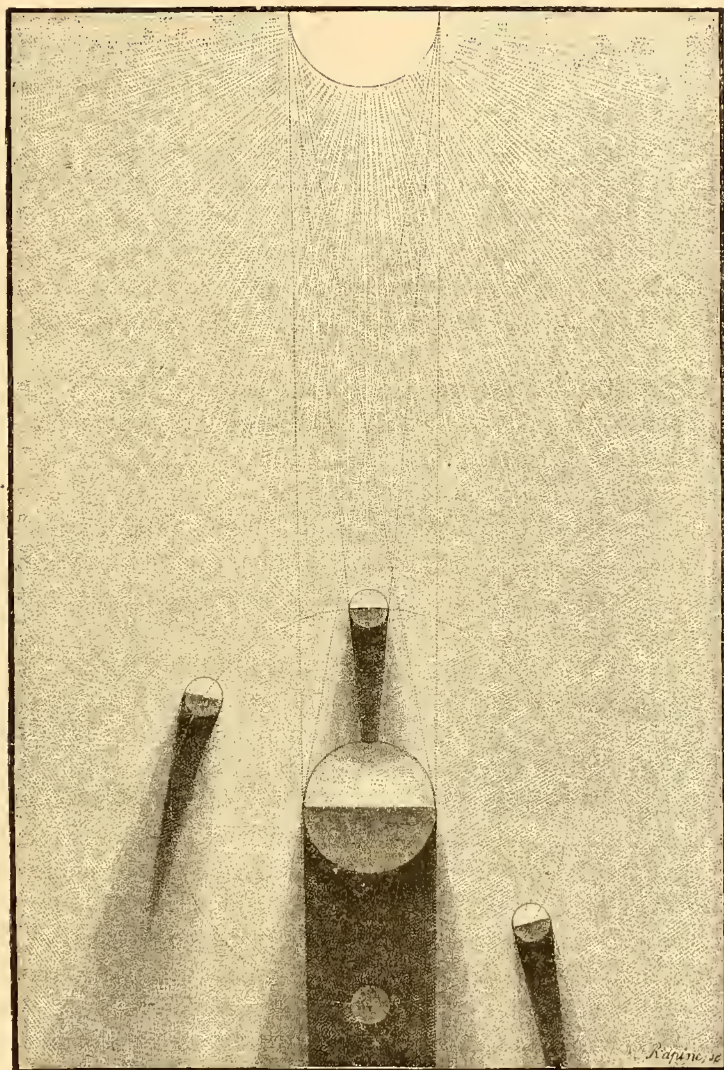


Fig. 354. Explication générale des éclipses de Soleil et de Lune. Positions relatives de la Lune, du Soleil et de la Terre.

ligne droite. Mais on a vu qu'il n'en est pas ainsi dans la réalité, que l'orbite de la Lune est inclinée sur le plan de l'écliptique, de sorte qu'il arrive le plus souvent, au moment de la nouvelle Lune, que notre satellite projette son cône d'ombre au-dessus ou au-dessous de la Terre. De

même à l'époque de l'opposition, la Lune, par sa situation en dehors du plan de l'écliptique, passe tantôt au-dessus tantôt au-dessous du cône d'ombre terrestre. Toutes les fois qu'il en est ainsi, il n'y a pas d'éclipse. Examinons donc quelles conditions sont nécessaires pour qu'une éclipse de Soleil ou de Lune soit possible.

L'orbite de la Lune, on l'a vu, est située dans un plan qui fait avec le plan de l'orbitre terrestre un angle à peu près constant (en moyenne 5° 8′ 47″). Il en résulte qu'une moitié de la révolution mensuelle s'effectue au-dessus de ce dernier plan, tandis que l'autre moitié s'accomplit au-dessous. La Lune passe donc par l'écliptique deux fois à chaque lunaison. Les deux positions qu'elle occupe pendant ces passages sont les *nœuds*. L'un se nomme le nœud ascendant, l'autre le nœud descendant, parce qu'ils correspondent, le premier au mouvement de la Lune qui s'élève du côté sud au côté nord de l'écliptique, le second au mouvement inverse.

Si les nœuds restaient invariables, dans leurs positions relatives au Soleil, il arriverait de deux choses l'une, ou qu'il n'y aurait jamais d'éclipses, ou qu'il se présenterait deux éclipses à chaque mois lunaire. Mais les nœuds se déplacent d'une lunaison à l'autre, et il est aisé de comprendre que l'éclipse aura lieu toutes les fois qu'ils coïncideront avec les phases de pleine et de nouvelle Lune, avec les syzygies. Cette coïncidence n'a pas besoin d'être parfaite : il suffit que les nœuds soient assez voisins de ces phases, pour que la largeur des cônes d'ombre rende possible l'immersion soit de la Lune, soit de la Terre.

Telle est la première condition générale de possibilité de ces phénomènes. Il en est d'autres encore qui sont propres à chaque genre d'éclipse, et dont nous allons dire un mot en décrivant séparément les éclipses de Soleil et les éclipses de Lune.

Comme la Lune, le Soleil et les nœuds de l'orbite lunaire se retrouvent à peu près dans les mêmes conditions relatives, au bout d'une période qui dure 6585 jours, — 18 ans et 10 ou 11 jours : c'est la période de Saros connue des anciens, — il en résulte que les éclipses, qui se sont produites dans cette période de 18 ans, se reproduisent encore dans le même ordre pendant les 18 années de la période suivante. Dans cet intervalle de temps, on compte 70 éclipses, parmi lesquelles 29 de Lune et 41 de Soleil.

§ 2. Éclipses de soleil.

Tout le monde sait qu'on distingue trois espèces d'éclipses solaires. Les unes sont *totales :* le disque obscur de la Lune recouvre alors entiè-

rement la surface apparente de l'astre radieux. Les autres sont *partielles :* c'est quand une portion seulement, plus ou moins grande d'ailleurs, du disque solaire est échancrée. Enfin, il y a des éclipses de Soleil *annulaires :* ces éclipses ont lieu quand le disque de la Lune n'est pas assez grand pour recouvrir entièrement celui du Soleil, et qu'un anneau lumineux d'une certaine largeur déborde, tout autour, l'hémisphère obscur de la Lune. La Lune étant beaucoup plus petite que le Soleil, on comprend que c'est sa faible distance relative qui nous montre son disque avec des dimensions apparentes égales à celle du disque solaire, et même plus grandes. Cette distance varie en raison de la forme elliptique de son orbite, et c'est pourquoi les dimensions du disque lunaire se trouvent tantôt plus grandes, tantôt plus petites que celles du Soleil, quelquefois égales. Cela revient à dire que le cône d'ombre pure, projeté par la Nouvelle Lune vers la Terre, atteint ou n'atteint pas la surface de notre globe. S'il atteint cette surface, il y a éclipse totale pour tous les points de la Terre qui s'y trouvent plongés; éclipse partielle pour toutes les régions atteintes seulement par la pénombre. C'est ce que fait voir la figure suivante :

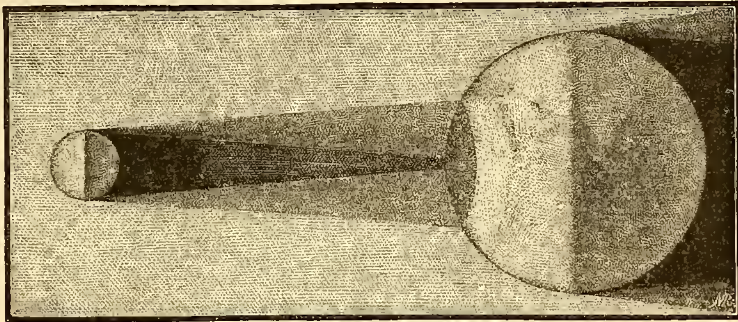


Fig. 355. Éclipse totale de Soleil.

Le cône d'ombre pure de la Lune n'atteint-il pas la Terre, il y a éclipse annulaire pour tous les points que rencontre le prolongement de ce cône; éclipse partielle pour ceux qui se trouvent seulement dans la pénombre. C'est le cas représenté par la figure 356.

On le voit, les conditions de possibilité des éclipses totales de Soleil sont les suivantes :

La Lune doit être en conjonction, c'est-à-dire nouvelle;

Elle doit être en même temps dans le voisinage de l'un de ses nœuds;

Enfin, sa distance à la Terre doit être moindre que la longueur du cône d'ombre pure projeté par elle dans l'espace.

Les mêmes conditions, sauf la dernière, sont celles des éclipses de Soleil annulaires.

Les personnes qui lisent, dans les annuaires scientifiques ou dans les almanachs, les éclipses annoncées et calculées d'avance par les astronomes, ont dû remarquer souvent ces mots : *invisibles à Paris* (ou dans tout autre lieu). Une éclipse de Soleil (nous parlerons plus loin de celles de la Lune) peut donc avoir lieu, sans être pour cela visible de tous les points de la Terre? Sans doute, et il est aisé de se rendre compte de cette circonstance.

D'abord, cela est évident pour tous les lieux où le Soleil reste couché pendant la durée entière de l'éclipse. Mais cela est non moins vrai pour beaucoup d'autres points de la surface terrestre, qui ont le Soleil au-dessus de leur horizon pendant la même durée. On peut présenter

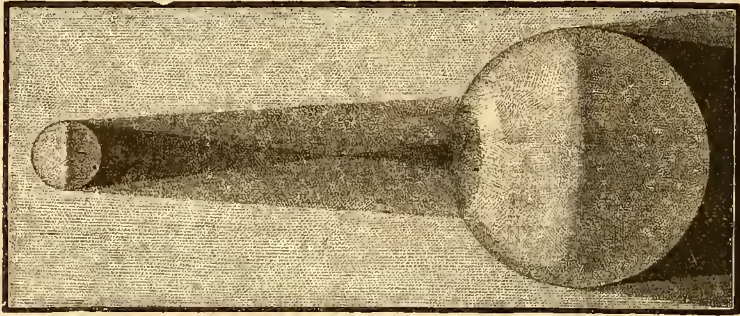


Fig. 356. Éclipse annulaire de Soleil.

l'explication de ce fait de plusieurs manières. Je me bornerai à celle-ci, qui me semble aisée à saisir, même sans figure.

La Lune a un diamètre près de quatre fois inférieur à celui de la Terre. Son cône d'ombre, dans sa plus grande largeur, est donc beaucoup trop étroit pour que la Terre puisse y être entièrement plongée; et vers ses extrémités, ses dimensions sont assez petites pour ne produire sur la surface de notre globe qu'un petit cercle noir de 22 lieues au plus de largeur. Une éclipse de Soleil n'est donc totale, à un même instant physique, que pour un cercle de cette dimension. Seulement, les mouvements de rotation et de translation de la Terre et le mouvement de translation de la Lune combinés, font que le cône d'ombre se promène en réalité sur une plus grande étendue, traçant une courbe obscure à la surface des continents et des mers[1]. Les mêmes observations s'appliquent à la pénombre. Ainsi, suivant la position des lieux

1. Le cône d'ombre projeté par la Lune dans l'espace a une longueur qui varie entre 57 et 59 rayons de la Terre. D'autre part, on a vu que la distance entre les centres de la Terre et de la Lune varie aussi entre 57 et 64 rayons terrestres. Du centre de la Lune au point le plus voisin de notre globe, il y a donc de 56 à 63 de ces rayons. Ainsi, le cône d'ombre pure peut

relativement au Soleil et à la Lune, le premier de ces astres peut être éclipsé totalement ou partiellement, ou même être seulement en contact simple avec le disque obscur de notre satellite.

Les théories astronomiques des mouvements de la Lune et de la Terre sont aujourd'hui assez perfectionnées pour que les astronomes puissent prédire avec précision ces phénomènes. Non-seulement le calcul indique le jour de l'éclipse, mais l'heure exacte, la durée, les dimensions ou les phases du phénomène pour chaque point de la



Fig. 357. Éclipse totale de Soleil du 18 juillet 1860. — Marche de l'ombre et de la pénombre à la surface de la Terre.

Terre. Des cartes sont ordinairement jointes à ces détails numériques, et montrent l'ensemble des points du globe où l'éclipse sera visible.

La figure 357 représente une carte de ce genre, pour l'éclipse totale de Soleil qui a eu lieu le 18 juillet 1860, d'après les indications de la *Connaissance des temps* et du *Nautical Almanach*, recueils publiés

atteindre la surface de la Terre, dans toute l'étendue de l'hémisphère tourné vers la Lune : de là, éclipse totale. S'il n'atteint pas cette surface, l'éclipse est seulement annulaire. Il peut arriver encore que la pénombre seule rencontre la Terre, le cône d'ombre et son prolongement passant alors au-dessus de notre globe. L'éclipse de Soleil peut donc encore n'être que partielle, quel que soit le lieu considéré.

plusieurs années à l'avance pour les besoins des astronomes et des navigateurs. Une courbe en forme de 8 marque les points du globe où l'éclipse a commencé ou fini au lever ou au coucher du Soleil. Une autre ligne, qui coupe la première en deux parties, passe par les lieux de la Terre qui n'ont vu que la moitié de l'éclipse, parce que le milieu du phénomène coïncidait pour eux, soit avec le lever, soit avec le coucher de l'astre radieux. Un trait plus noir marque les points où l'éclipse était centrale, et de chaque côté une bande grisâtre d'une certaine largeur indique les points où elle était simplement totale. Parallèlement à ce trait, d'autres lignes qui ne sont pas marquées sur le dessin indiqueraient tous les points où l'éclipse partielle s'est montrée sous des phases[1] de plus en plus petites, jusqu'à celle qui limite le phénomène, en passant par tous les lieux où l'éclipse se réduisait à un simple contact des disques de la Lune et du Soleil.

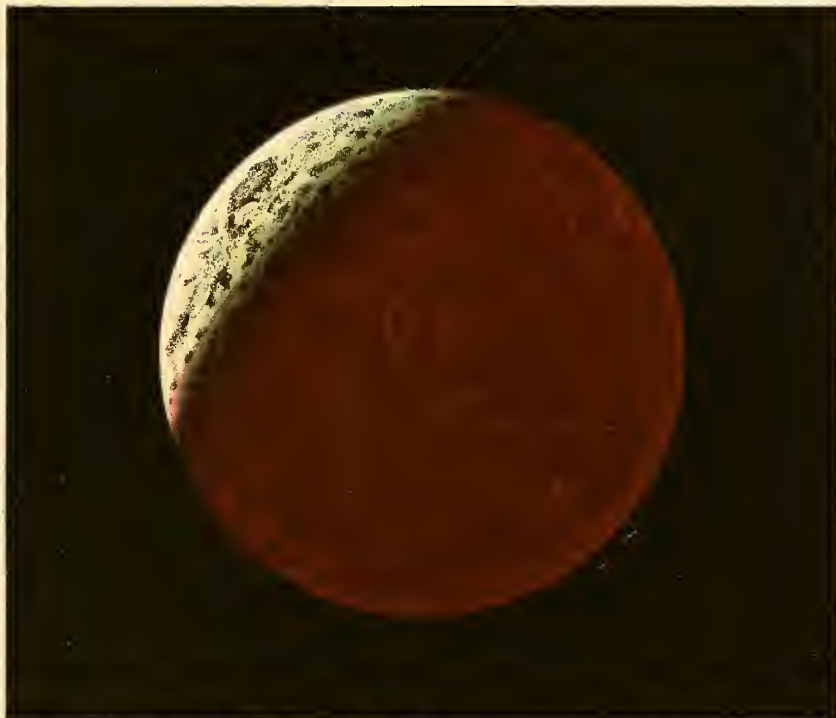
La ligne noire de l'éclipse totale n'est, en réalité, que la trace de l'ombre promenée par la Lune sur la surface de la Terre, comme la figure dans son ensemble représente la marche de la pénombre sur la même surface.

La durée d'une éclipse de Soleil est variable. Mais il faut distinguer évidemment entre la durée totale du phénomène pour la Terre entière, et la durée pour un point donné du globe. Voici, d'après les calculs de Dionis du Séjour, rapportés par Arago, quelques nombres relatifs à cette dernière durée :

Pour la plus grande durée possible d'une éclipse totale,	le long de l'Équateur	$4^h\ 29^m\ 44^s$
	sous la latitude de Paris	$3^h\ 26^m\ 32^s$
Pour la plus grande durée possible de la phase annulaire,	le long de l'Équateur	$12^m\ 46^s$.
	sous la latitude de Paris	$9^m\ 56^s$
Pour la plus grande durée possible de l'obscurité totale,	le long de l'Équateur	$7^m\ 58^s$
	sous la latitude de Paris	$6^m\ 10^s$

L'éclipse totale de Soleil, dont la figure précédente donne le tracé à la surface du globe terrestre, commença à 0 heure 3 minutes du soir, temps moyen de Paris, et finit à 5 heures 6 minutes du soir, après avoir ainsi duré dans l'ensemble de ses phases 5 heures 3 minutes. A Paris, où l'éclipse ne fut que partielle, la durée du phénomène fut seulement de 2 heures 14 minutes. La dernière éclipse totale de Soleil, celle du 18 août 1868, a duré 5 heures 15 minutes pour la Terre entière; elle a été très-remarquable par la longue durée de la phase de totalité qui s'est élevée en certains points jusqu'à 6 minutes 47 secondes.

1. Les astronomes comptaient autrefois la largeur des phases par le nombre de *doigts :* le doigt était la douzième partie du diamètre du disque solaire. L'éclipse est de trois doigts, de six doigts, quand le disque obscur de la Lune, par son échancrure, pénètre jusqu'aux 3/12, aux 6/12, c'est-à-dire au quart, à la moitié du diamètre du Soleil.





Pralon Lith Imp Frauiery

ÉCLIPSE TOTALE ET ÉCLIPSE PARTIELLE DE LUNE

Coloration du disque éclipsé par la réfraction des rayons solaires
dans l'atmosphère terrestre.

Parmi les 41 éclipses de Soleil qui ont lieu tous les dix-huit ans, il en est 28 qui sont centrales, et qui, par conséquent, sont visibles quelque part à la surface du globe terrestre comme éclipses totales, ou comme éclipses annulaires. Cela fait, par siècle, 227 éclipses de Soleil, dont 155 sont centrales. Mais il s'en faut qu'elles soient aussi fréquentes pour un lieu donné de la Terre, et l'observation n'en est pas toujours facile. Cela explique pourquoi les éclipses totales observées étaient si rares il y a deux siècles. Depuis le seizième jusqu'au commencement du dix-neuvième siècle, on n'a pu observer en tout que neuf éclipses totales de Soleil; sept autres ont été annulaires. Paris, pendant tout le dix-huitième siècle, n'a été témoin que d'une seule éclipse totale, celle de 1724; et Londres, aussi favorisée que la capitale de la France, n'en a eu aucune depuis 1715. Depuis 1801, on a pu observer dix éclipses totales, celles de 1806, 1842, 1850, 1851, 1856, 1860, 1861, 1868, 1869 et 1871.

Les éclipses de Soleil, pas plus que celles de la Lune, n'ont aujourd'hui le privilége d'exciter la frayeur, du moins parmi les populations civilisées. Au lieu d'une terreur superstitieuse, c'est un intérêt de curiosité qu'elles inspirent. Annoncées partout longtemps d'avance, elles témoignent de la précision des calculs astronomiques, et le public s'habitue peu à peu partout à voir la fixité des lois, l'ordre et l'harmonie, là où jadis l'ignorance ne supposait que des accidents fortuits, des signes précurseurs du mal, des témoignages de la colère céleste.

Quant à l'astronome, il y trouve matière à des recherches curieuses. Les éclipses partielles, les moins intéressantes de toutes, lui donnent encore l'occasion de vérifier l'exactitude de ses tables, par les concordances ou les divergences que l'observation constate entre l'heure prédite par les calculs et l'heure réellement observée. Mais ce sont les éclipses totales, surtout les dernières, celles de 1842, 1850, 1851, 1858, 1860, 1861, 1868, qui ont été fécondes en faits nouveaux, ou du moins nouvellement observés : on a vu, dans le livre consacré au Soleil, quel intérêt est résulté de ces observations pour l'étude de la constitution physique de l'astre. Nous n'y reviendrons donc point.

§ 3. ÉCLIPSES DE LUNE.

Comme les éclipses de Soleil, les éclipses de Lune peuvent être partielles ou totales. Mais elles ne sont jamais annulaires, le cône d'ombre de la Terre ayant toujours, aux plus grandes distances de notre satellite, des dimensions beaucoup plus considérables que le disque lunaire lui-

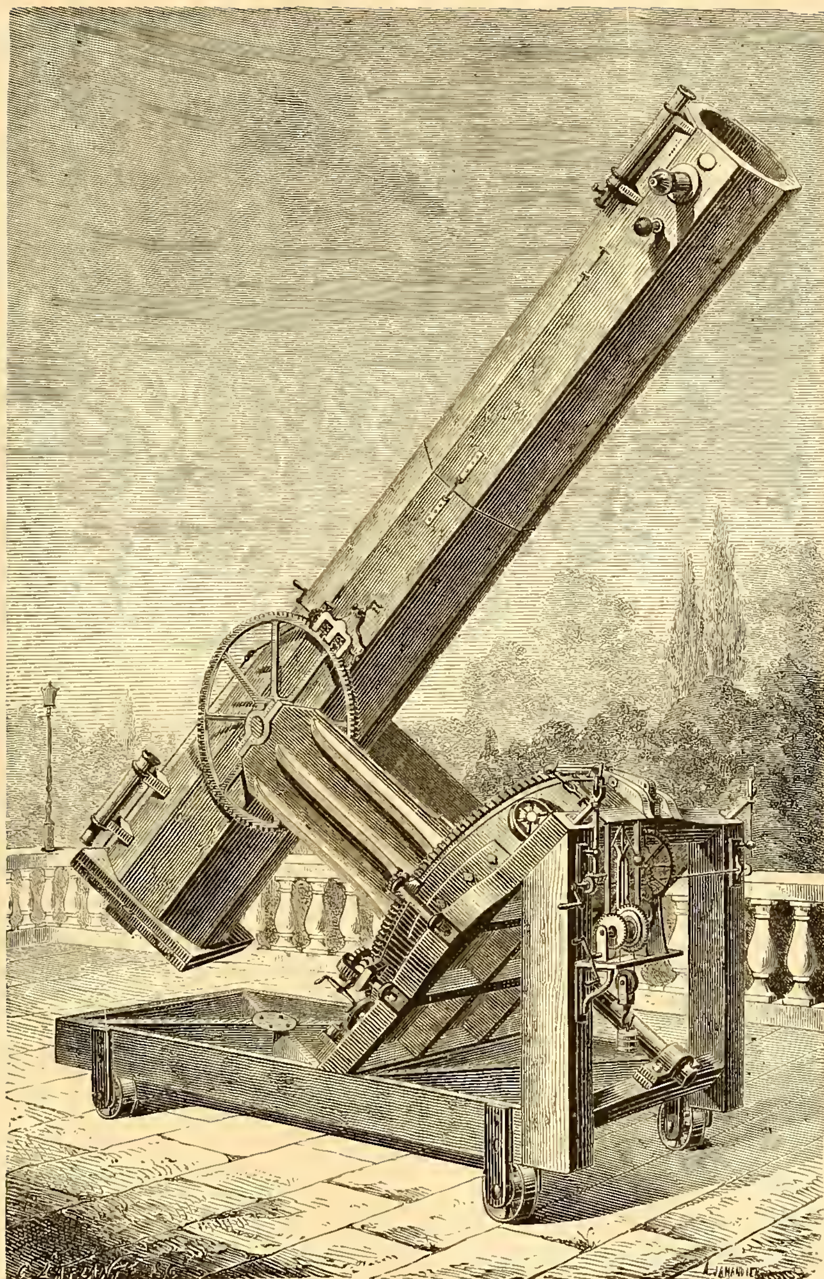
même. En outre, une distinction capitale entre les deux phénomènes est celle-ci : tandis qu'une éclipse de Soleil n'est visible que pour une fraction de l'hémisphère terrestre qui voit cet astre sur l'horizon, l'éclipse de Lune est toujours visible de tous les points de la Terre pour lesquels l'astre n'est pas couché. Bien mieux : ce n'est que successivement que l'éclipse de Soleil a lieu aux différentes stations, à mesure que l'ombre et la pénombre de la Lune se promènent sur la surface de notre globe. Au contraire, l'obscurcissement du disque lunaire commence et se termine partout, non pas aux mêmes heures, puisque l'heure varie selon le méridien du lieu de l'observation, mais aux mêmes instants physiques. Le lecteur a déjà compris la raison de cette différence essentielle. Dans l'éclipse solaire, la surface de l'astre radieux n'est pas réellement obscurcie, mais seulement cachée par le disque obscur de la Lune, de sorte que cette interposition est un effet de perspective variant selon la position respective de l'observateur, de la Lune et du Soleil. L'éclipse lunaire est au contraire produite par une déperdition réelle de lumière de notre satellite, et l'obscurcissement qui en résulte est visible au même instant, partout où la Lune est en vue.

On peut aisément se rendre compte des circonstances qui rendent une éclipse de Lune partielle ou totale. Quand la Lune, d'ailleurs en opposition, traverse le cône d'ombre pure de la Terre dans sa plus grande épaisseur, l'éclipse est totale et centrale, et sa durée est la plus grande possible. L'éclipse peut être encore totale, sans être centrale, quand l'orbite de la Lune traverse le cône d'ombre dans une épaisseur suffisante. Mais si le nœud de la Lune est trop éloigné du cône, son disque ne pénétrant qu'en partie dans l'ombre, ne subira qu'un obscurcissement incomplet : l'éclipse sera partielle.

Au début d'une éclipse totale de Lune, on remarque un affaiblissement d'abord léger, puis de plus en plus marqué de la lumière du disque; à ce moment la Lune entre ou est entrée depuis quelque temps dans la pénombre. Puis, tout à coup, une petite échancrure se forme sur le bord, qui peu à peu envahit la partie lumineuse du disque, mais cette échancrure est loin d'être aussi nette que celle des éclipses solaires. La forme en est circulaire, mais d'une courbure moins prononcée, circonstance aisée à prévoir et que le calcul confirme, le diamètre de l'ombre de la Terre étant près de trois fois aussi grand que celui de la Lune[1].

La couleur de l'ombre est d'abord celle d'un noir grisâtre, qui ne permet de rien voir de la partie éclipsée; mais, à mesure que l'ombre envahit le disque lunaire, une teinte rouge le recouvre de plus en plus,

1. La largeur moyenne du cône d'ombre terrestre, à la distance où se font les éclipses, est de 82′, tandis que le diamètre lunaire n'est que de 31′.



GRAND TÉLESCOPE A MIROIR ARGENTÉ
(système Léon Foucault)
monté équatorialement pour l'observatoire de Marseille.

et les détails des taches principales deviennent visibles. Entre le croissant lumineux et le centre rougeâtre de l'ombre s'étend une bande d'un gris bleu, comme le montre la planche LI (*Éclipse totale et éclipse partielle de Lune*). Dès que l'éclipse est totale, le rouge devient plus intense et se répand aussitôt sur tout le disque. Selon Beer et Mædler, la teinte bleuâtre est d'un gris sombre, quand on la compare avec la partie de la Lune éclairée par le Soleil; elle semble bleue et plus claire que le rouge, si c'est avec cette dernière qu'on la compare. Quelques minutes avant la réapparition de la lumière au bord opposé du disque, la teinte bleuâtre colore légèrement les régions les plus voisines de ce bord; et les phases de l'éclipse se reproduisent en sens inverse jusqu'à l'entière émersion de la Lune. Comme on le voit, la Lune ne disparaît pas toujours complètement dans les éclipses totales. La raison de ce fait est dans la réfraction des rayons solaires, qui, traversant les couches inférieures les plus denses de l'atmosphère de la Terre, se brisent et projettent jusqu'à la Lune les teintes empourprées de nos soleils couchants. Il arrive cependant que la Lune devient tout à fait invisible pendant la durée de l'éclipse totale : on cite comme exemples de ce fait les éclipses de 1642 et de 1816. D'autres fois la visibilité, sans être nulle, est très-imparfaite : il faut chercher l'explication de ces circonstances dans l'état particulier de l'atmosphère, sur toute la périphérie terrestre comprenant les lieux où le Soleil se lève et se couche au moment de l'éclipse.

Un autre phénomène, qui se présente il est vrai fort rarement, paraît contradictoire avec la théorie géométrique et astronomique des éclipses. Je veux parler de la présence simultanée du Soleil et de la Lune au-dessus de l'horizon, pendant le phénomène. Le premier de ces astres se couchant au moment où l'autre se lève, il semble que la Lune, la Terre et le Soleil ne sont plus en ligne droite. Il n'y a là qu'une apparence due à la réfraction. Le Soleil, déjà sous l'horizon, est relevé par la réfraction et reste visible pour nous. Il en est de même de la Lune qui n'est pas encore réellement levée, lorsqu'elle nous semble déjà l'être. On cite les éclipses de 1666, de 1668 et du 19 juillet 1750, comme ayant présenté cette circonstance singulière.

§ 4. ÉCLIPSES DES SATELLITES DE JUPITER.

La planète de Jupiter, nous l'avons vu, est accompagnée, dans son mouvement de translation autour du Soleil, de quatre satellites qui circulent autour d'elle dans des périodes régulières. Les plans dans lesquels s'effectuent les mouvements de ces petits corps coïncident, à peu de chose près, avec le plan de l'orbite de Jupiter. Or, Jupiter étant

opaque projette derrière lui, c'est-à-dire à l'opposé du Soleil, un cône d'ombre dont l'axe est couché sur le plan de son orbite. Il en résulte que, dans leurs révolutions successives autour de la planète centrale, les satellites viennent traverser ce cône à l'époque de leurs oppositions.

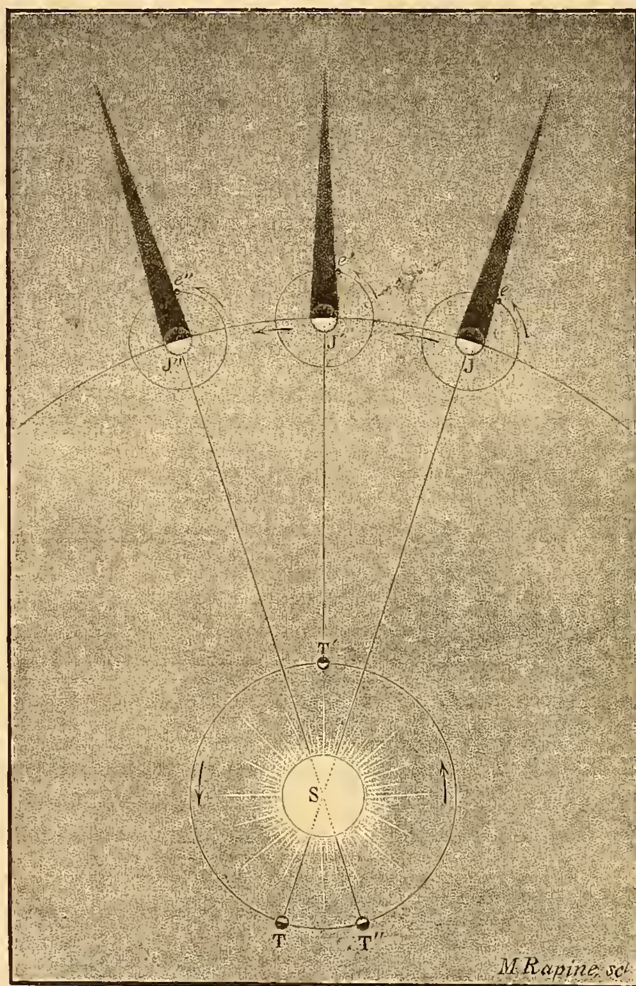


Fig. 358. Éclipses des satellites de Jupiter.

Pendant toute la durée du trajet dans l'ombre, la lumière que ces corps recevaient du Soleil est interceptée : ils subissent une éclipse.

Les éclipses des satellites de Jupiter, surtout celles des trois satellites les plus voisins de la planète, sont très-fréquentes; et, de la Terre, il est aisé d'observer leurs émersions et leurs immersions en s'aidant d'une lunette de moyenne puissance. Quand le point lumineux entraîné

par son mouvement de révolution autour de la planète vient à pénétrer dans le cône d'ombre, sa lumière s'éteint : c'est l'instant d'une *immersion*. Il continue alors sa course dans l'ombre jusqu'au moment où, sortant du cône, sa lumière reparaît : c'est le moment de l'*émersion*. Ces deux phénomènes ne sont pas visibles de la Terre pendant la même éclipse, pour les deux satellites les plus voisins de Jupiter, ces satellites se trouvant masqués par le corps opaque de la planète, tantôt au moment de leur immersion, tantôt au moment de leur émersion.

De plus, on ne peut les observer d'aucune façon à l'époque de la conjonction ou à celle de l'opposition, le cône d'ombre se trouvant alors entièrement caché par le disque de la planète, ainsi qu'on peut aisément s'en rendre compte à l'aide de la figure 359. Il est tout aussi facile de voir pourquoi ce sont les immersions qui sont visibles pour nous, depuis l'époque de la conjonction jusqu'à l'opposition suivante, tandis que les émersions au contraire sont visibles de l'opposition à la conjonction.

Jupiter, en effet, se meut dans le même sens que la Terre, mais beaucoup plus lentement qu'elle dans son orbite. Quand la Terre est en T et que Jupiter est en J sur le prolongement du rayon vecteur TS, c'est l'époque de la conjonction. A partir de cet instant, la Terre décrivant un certain arc sur son orbite, et Jupiter un arc de moindre amplitude sur la sienne, l'observateur se trouve porté à la droite du cône d'ombre de Jupiter, et dès lors peut voir les immersions des satellites. Les mêmes circonstances ont lieu jusqu'à l'instant où, la Terre étant en T', Jupiter est en J', toujours sur le prolongement du rayon, mais à l'opposé du Soleil, c'est-à-dire jusqu'à l'opposition. Alors, par le fait des mouvements simultanés de la Terre et de Jupiter, la première de ces planètes se porte à gauche du cône d'ombre projeté par la seconde, et ce sont les émersions des satellites qui sont visibles, jusqu'à la nouvelle conjonction T'' J''. Quant aux deux satellites les plus éloignés de Jupiter, l'inclinaison de leurs plans sur l'écliptique jointe à leurs plus grandes distances de la planète, fai que, de la Terre, on peut apercevoir leur immersion et leur émersion pendant la même éclipse.

III

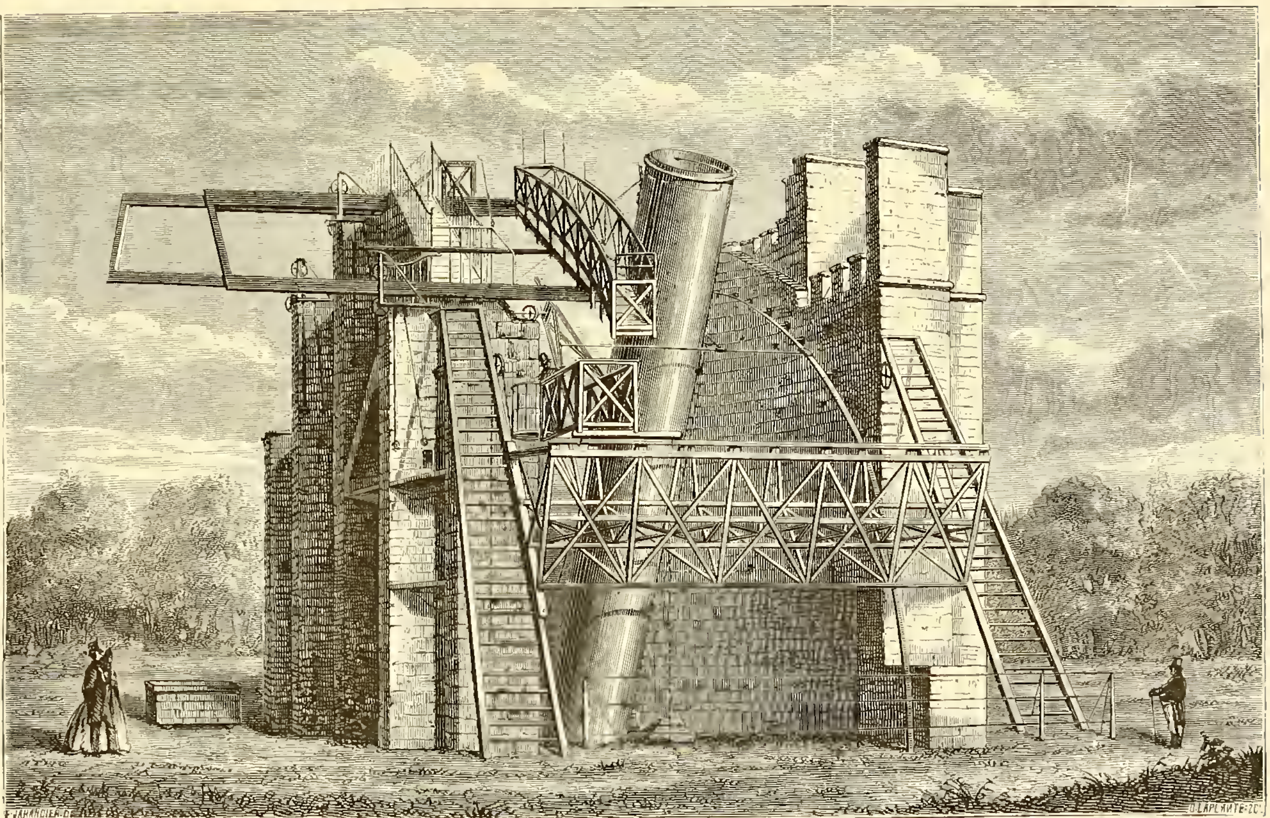
PASSAGES DE MERCURE ET DE VÉNUS.

§ 1. PASSAGES DE LA PLANÈTE MERCURE SUR LE SOLEIL.

On donne le nom de *passages* aux petites éclipses partielles, d'ailleurs généralement invisibles à l'œil nu, qui proviennent de l'interposition des planètes inférieures entre le Soleil et la Terre. Quand Mercure, Vénus se trouvent à leurs conjonctions, c'est-à-dire quand la longitude de leurs centres est égale à celle du centre du Soleil, il arrive le plus souvent que leur latitude n'est pas nulle, c'est-à-dire qu'elles se trouvent à une certaine hauteur au-dessus du plan de l'écliptique, et même, généralement, que cette hauteur surpasse le demi-diamètre du Soleil. Dans ce dernier cas, il n'y a point passage; c'est l'inclinaison des plans de leurs orbites sur l'écliptique qui en est cause, et la raison est la même, comme il est aisé de le comprendre, que celle qui empêche la Lune d'éclipser le Soleil à chacune de ses conjonctions.

Pour qu'il y ait passage, il faut donc que l'instant de la conjonction soit assez voisin de celui où la planète passe à l'un de ses nœuds, pour que la portion de trajectoire décrite aille couper le disque solaire, ce qui a lieu, alors, suivant une corde d'autant plus grande que le passage de la planète à son nœud est plus rapproché du moment précis de la conjonction.

En comparant les orbites de Mercure et de la Terre, on voit que les nœuds de Mercure se trouvent sur un diamètre qui correspond aux positions de notre planète vers le 5 mai, d'une part, vers le 7 novembre de l'autre. C'est donc dans les mois de mai et de novembre que doivent avoir lieu les passages de Mercure. Or, supposons qu'une telle coïncidence ait lieu, c'est-à-dire que le passage au nœud se fasse précisément quand la Terre a même longitude que le nœud, ou une longitude assez rappro-



GRAND TÉLESCOPE DE LORD ROSSE
à Parsonstown (Irlande).

chée, et que Mercure se projette sous forme d'une tache noire et ronde, traversant le disque solaire. D'une date ainsi connue, peut-on déduire les époques des passages, soit passés, soit à venir, de la planète? La question est de trouver des multiples communs des durées de la révolution sidérale de la Terre, des révolutions sidérale et synodique de Mercure, puis, en s'appuyant sur les tables du Soleil et de la planète, d'étudier les conditions précises de position de leurs centres aux époques ainsi trouvées. C'est un calcul assez complexe, dont la première ébauche est due à Képler (1627).

Dès le dix-neuvième siècle, Averrhoès croyait avoir vu Mercure sur le Soleil. Scaliger, puis Képler, en mai 1607, crurent aussi apercevoir la

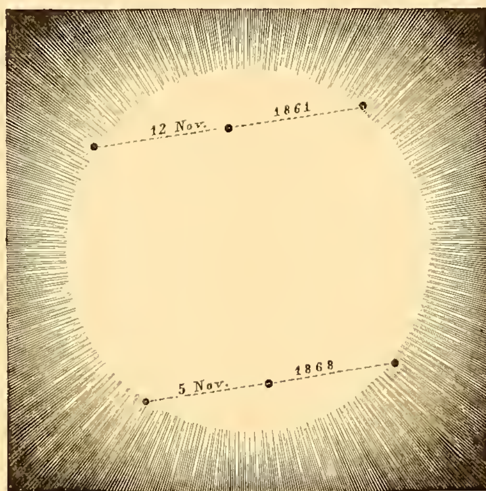


Fig. 359. Passages de Mercure sur le Soleil : 1° le 12 novembre 1861; 2° le 5 novembre 1868.

planète; mais comme leurs observations étaient faites à l'œil nu, que Mercure n'a jamais un diamètre supérieur à 12″, et qu'un point noir de cette dimension est trop petit pour être vu, sans le secours des lunettes, il est probable qu'il s'agissait de taches solaires de grands diamètres. C'est Gassendi qui, le premier, observa le phénomène du passage, le 7 novembre 1631, vérifiant ainsi la prédiction faite par Képler[1]. Le second témoin du passage de Mercure fut un astronome anglais, Shakerley, qui se rendit exprès à Surate, pour observer celui du 2 novembre 1651; ce passage n'ayant lieu que de nuit, était invisible pour l'Europe.

1. « La première de ces observations, dit d'Alembert dans l'*Encyclopédie*, fut faite à Paris par Gassendi, le 7 novembre 1631, et, comme dit ce philosophe, selon le vœu et l'avertissement de Képler. Car Képler avait prédit ce passage et en avait publié ou écrit l'année précédente qui fut celle de sa mort. »

Halley et Delambre reprirent les calculs de Képler, et le premier de ces savants détermina les périodes de retour des passages de Mercure, lesquelles sont de 6 à 7 ans, de 13, de 46 et de 263 ans. Lalande en a publié une table qui, pour les passages de mai, au nombre de 13, comprend ceux qui ont eu ou doivent avoir lieu depuis 1615 jusqu'à 1891, et pour ceux de novembre (nœud ascendant), au nombre de 27, comprend les passages de 1605 à 1894. Jusqu'à la fin du dix-neuvième siècle, il y aura encore quatre passages de Mercure, deux passages de mai, en 1878 et en 1891, et deux passages de novembre, en 1881 et en 1894.

La durée d'un passage est très-variable. Elle est au maximum d'environ 8 heures. Parmi les quarante passages de la table de Delambre, la durée minimum, calculée pour le centre de la Terre, est celle de novembre 1776, qui fut de une heure onze minutes environ ; et la plus grande, celle de mai 1707, qui s'est élevée à sept heures cinquante-quatre minutes.

§ 2. PASSAGES DE VÉNUS SUR LE SOLEIL.

Les passages de Mercure n'ont pas la même importance que ceux de Vénus, si ce n'est pour la théorie des mouvements planétaires. Au point de vue physique, on a vu qu'ils ont été l'occasion de quelques observations d'où l'on a conclu l'existence d'une épaisse atmosphère environnant Mercure ; ils servent aussi à la détermination du diamètre de la planète ; mais jusqu'à présent les diverses mesures trouvées sont loin d'être concordantes. Ce sera une étude à reprendre avec soin, lors des prochains passages, et il faut espérer que les observateurs sauront se garantir des causes d'erreurs qui ont été longuement analysées à l'occasion des observations du dernier passage de Vénus.

Les passages de Vénus sur le Soleil sont beaucoup plus rares que ceux de Mercure ; mais, en revanche, ils fournissent une méthode propre à donner, avec une certaine approximation, la parallaxe du Soleil, ou, ce qui revient au même, la distance du Soleil à la Terre. C'est également à Képler que revient l'honneur d'avoir le premier annoncé, prédit ces passages. Il calcula ceux de 1631 et de 1761, mais le second seul fut observé ; le passage de 1631 ne le fut pas, bien que Gassendi, qui avait réussi, la même année, à être témoin du passage de Mercure, ait cherché à voir également le passage de Vénus, sans doute parce que les calculs de Képler, basés sur les tables Rudolphines des planètes, tables encore peu exactes, n'avaient pas fixé avec une rigueur suffisante l'instant du phénomène.

Halley calcula une table des passages de Vénus, comme il avait fait pour ceux de Mercure. Elle fut amendée par Delambre ; et depuis, les

progrès de l'astronomie d'observation ont permis de fixer avec une grande exactitude l'époque des futurs passages, qui se reproduisent périodiquement. Voici quelques nombres relatifs à ces périodes. Si l'on veut, en partant d'un passage au nœud ascendant (lequel a lieu dans les premiers jours de décembre), trouver les époques des passages suivants au même nœud, il faut employer alternativement des périodes de 235 ans et de 8 ans. Ainsi, il y eut, le 4 décembre 1639, un passage de Vénus qui fut observé en Angleterre; 235 ans plus tard, le 8 décembre 1874, un autre passage au nœud ascendant a eu lieu, lequel sera suivi en 1882, c'est-à-dire 8 ans après, d'un autre passage de décembre. Il faudra attendre ensuite l'année 2117 (1882+235) pour retrouver un semblable passage. Les deux mêmes périodes donnent la suite des passages de Vénus au nœud descendant, c'est-à-dire de ceux qui ont lieu en juin. Ainsi, le passage du 5 juin 1761 a été suivi de celui du 3 juin 1769; 235 ans après, viendra le passage du 7 juin de l'an 2004, suivi, après 8 années, de celui du 5 juin 2012, et ainsi de suite. Mais, pour aller d'un passage d'un nœud à l'autre, il faut employer les périodes de 121 ans 1/2 et de 105 ans 1/2. C'est ainsi que de décembre 1639 (nœud ascendant), on passe à juin 1761 (nœud descendant), et de juin 1769 (nœud descendant) à décembre 1874 (nœud ascendant).

Des deux passages du dix-neuvième siècle, de 1874 et de 1882, le premier a été l'objet d'expéditions scientifiques nombreuses, et il est probable que le second ne sera pas observé avec moins de soin. Nous espérions pouvoir indiquer, au moins approximativement, le résultat obtenu pour celui de 1874, mais les travaux des diverses missions ne sont publiés que partiellement, et n'ont pas encore été discutés. Force nous est donc de nous en tenir à quelques brèves indications sur ce sujet important

La détermination de la parallaxe solaire par la méthode fondée sur les observations des passages de Vénus, indiquée par Halley dès l'année 1691, a été pour la première fois appliquée en 1761 et en 1769. Diverses expéditions scientifiques furent envoyées alors aux Indes, en Sibérie, à Sainte-Hélène, pour observer le passage de Vénus du 6 juin 1761 : les résultats furent peu satisfaisants, soit à cause du choix des stations pour lesquelles les différences de durée du passage n'étaient pas assez considérables, soit par les difficultés matérielles de l'installation des observateurs. On fut plus heureux le 3 juin 1769. La durée totale du phénomène fut observée dans des conditions favorables par le P. Hell à l'île de Wardhus, par Chappe d'Auteroche en Californie, par Green à Taïti, et en outre en Amérique, dans la baie d'Hudson, à Kola, dans le nord de la Russie. La discussion des observations fournit diverses valeurs assez concordantes pour la parallaxe solaire, qui parut comprise entre

8″.50 et 8″.88. Depuis, Encke [1], ayant repris avec un très-grand soin cette discussion, a trouvé 8″.57, nombre qui était généralement adopté, et qui concordait avec les résultats d'autres méthodes, quand des travaux plus récents, dus à Hansen, à MM. le Verrier, Stone, Powalky, conduisirent à le considérer comme trop faible. Nous avons donné, page 35, les diverses valeurs de la parallaxe du Soleil, déduites de ces travaux, ains

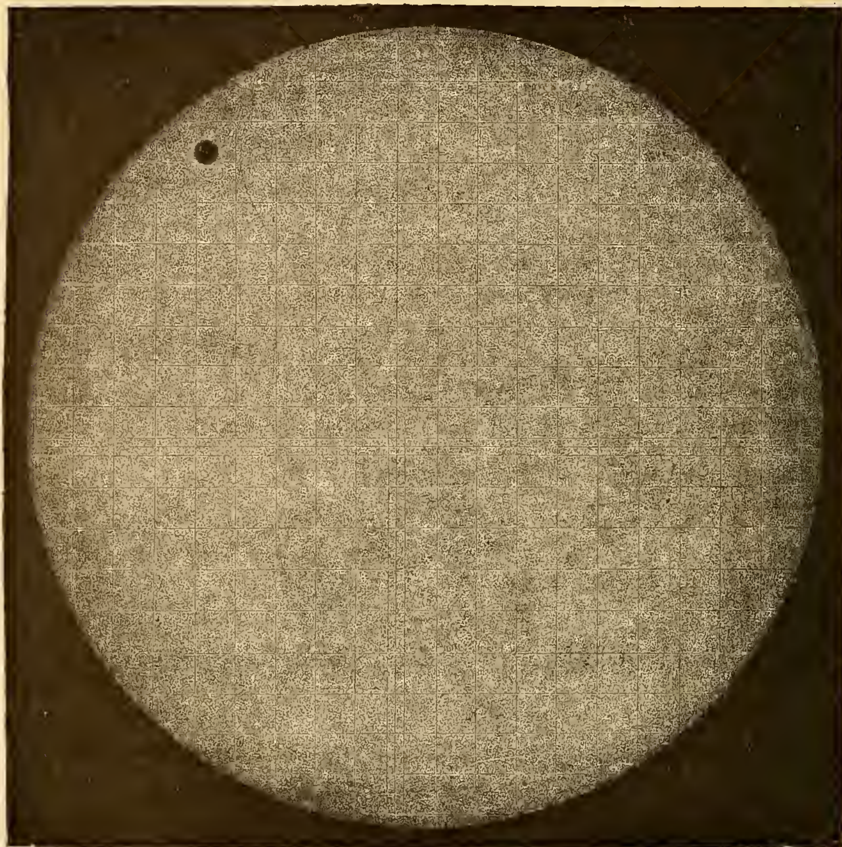
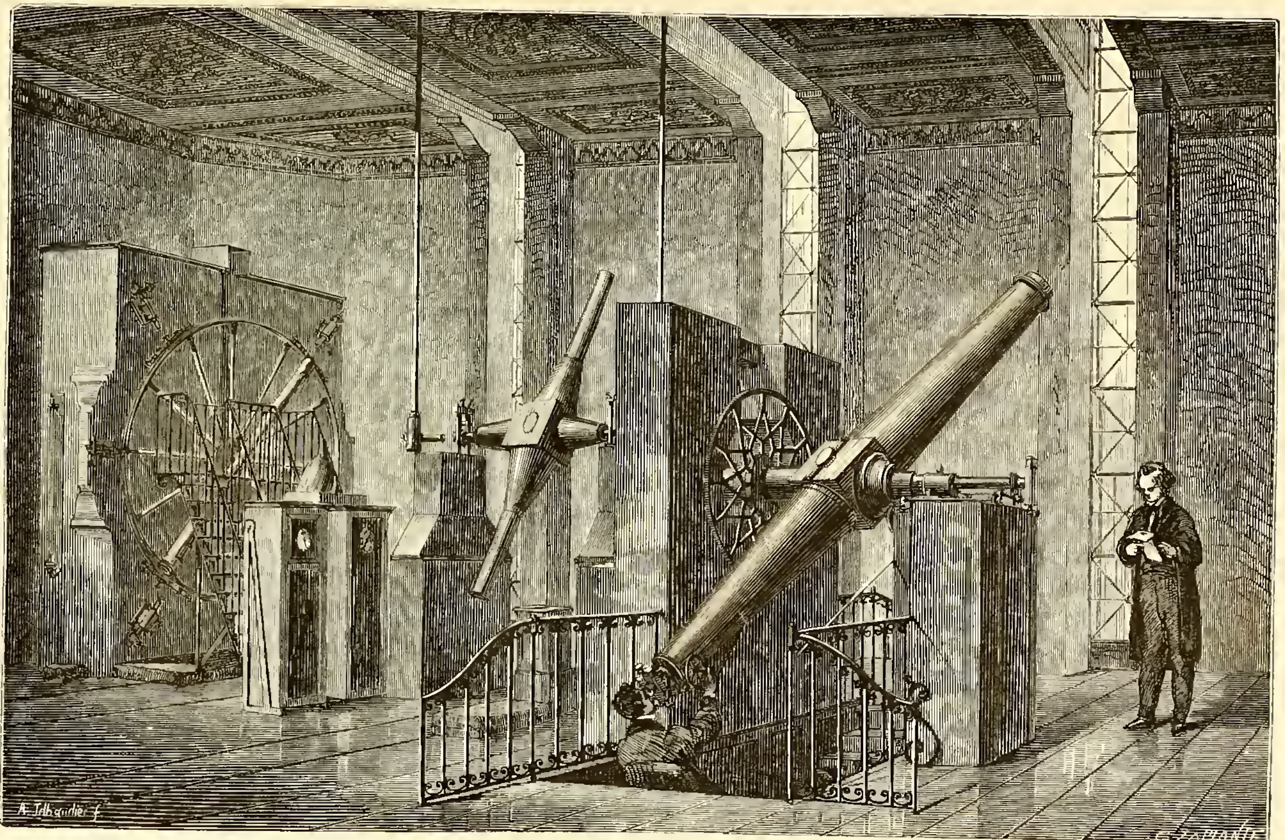


Fig. 360. Vénus sur le disque solaire, le 9 décembre 1874. Auréole lumineuse, d'après une photographie de M. Janssen.

que celles déduites d'autres méthodes : c'est entre ces diverses valeurs qu'il y a lieu de prononcer, et toute la question est de savoir si les observations du passage de Vénus permettront d'assurer à la parallaxe une approximation plus certaine que les autres méthodes.

1. Un *lapsus calami* nous a fait écrire, dans le tableau de la note de la page 35, le nom de Bessel au lieu de celui d'Encke. Nous prions le lecteur de corriger cette faute, qui nous a échappé à la lecture des épreuves.



GRANDE LUNETTE MERIDIENNE
de l'Observatoire de Paris.

Nous avons rapporté, dans le chapitre consacré à Vénus, les phénomènes physiques remarquables dont divers observateurs ont été témoins, soit avant l'entrée de la planète sur le disque solaire, soit après la sortie, soit enfin pendant la durée du passage. Il n'y a donc pas lieu d'insister sur ces faits intéressants, qui ont prouvé, comme on en avait déjà d'autres témoignages, que Vénus est entourée d'une atmosphère absorbante très-épaisse. On peut voir, dans la figure 360, une reproduction d'une photographie obtenue par M. Janssen pendant le passage : un faible anneau nébuleux environne le cercle noir de Vénus, au moment où la planète se projetait sur le bord du Soleil, et cet anneau a une teinte légèrement plus lumineuse que le fond du disque solaire en ce point. Il ne paraît pas douteux qu'il y a là l'indice de l'existence d'une atmosphère très-dense [1].

1. On peut à la vérité se demander comment des couches gazeuses qui ne brillent pas d'une lumière propre, qui ne sont éclairées que par celle du Soleil, peuvent réfléchir une lumière plus intense que celle de la source. C'est là une difficulté que nous regarderions comme insoluble, si le disque de Vénus se projetait sur les parties centrales du disque, c'est-à-dire sur les plus lumineuses. Mais on a vu que la lumière des bords du Soleil est beaucoup moins intense que celle du centre; et, comme Vénus et la portion de son atmosphère visible reçoivent la totalité de l'illumination solaire, on comprend que cette couche gazeuse puisse renvoyer plus de rayons que la région sur laquelle la photographie nous la montre projetée. Les propriétés photogéniques n'étant pas identiques avec les propriétés purement optiques, on pourrait aussi récuser le témoignage de la photographie. Mais, d'une part, l'observation télescopique est en pleine concordance avec l'image sur le collodion; et d'autre part, même dans l'hypothèse où il en serait autrement, ne serait-ce pas un indice de l'existence d'une atmosphère que l'anneau visible sur cette image? Si le disque de Vénus n'était pas entouré d'une couche gazeuse ou vaporeuse, rien n'expliquerait la modification subie tout autour du globe de la planète, modification qui se traduit photogéniquement par une zone plus claire que la portion voisine du disque du Soleil.

IV

ORIGINE ET FORMATION DU MONDE SOLAIRE.

HYPOTHÈSE DE LAPLACE SUR L'ORIGINE ET LA FORMATION DU SOLEIL ET DES PLANÈTES.

L'esprit humain semble ainsi fait, qu'il s'attache avec plus d'opiniâtreté et de persévérance à la poursuite des questions insolubles, qu'à la recherche de celles qui lui sont vraiment accessibles. Au risque d'une sorte de vertige intellectuel, il aime à se pencher sur le bord de ces abîmes de la pensée, au fond desquels gisent pêle-mêle les solutions de tant de graves problèmes, l'origine et la fin des choses, l'essence de la cause première, et tant d'autres questions qui sont plutôt du domaine de la métaphysique que de la science.

Cette tendance vers l'absolu est pour ainsi dire irrésistible. Il ne nous suffit pas de sonder, avec le télescope, les profondeurs de l'espace indéfini, où l'œil voit se succéder sans relâche les soleils et leurs agglomérations : nous voulons encore savoir si cette progression a une fin, une limite. Nous ne pouvons croire au néant, et notre pensée s'abîme dans la contemplation de la chaîne indéfinie des êtres.

Par une semblable curiosité, nous cherchons à remonter le cours du temps, et à nous imaginer l'origine première de toutes choses. Nous savons à peu près quel est l'état actuel de l'univers. La découverte des lois les plus générales nous autorise à prédire l'état futur des corps célestes, au moins dans notre système. Nous cherchons en outre à savoir qu'est-ce qui leur a donné naissance, et, à défaut de connaissances positives, si difficiles à acquérir en pareille matière, nous nous rattachons aux traditions qui ont eu cours dans les premiers âges de l'humanité, premiers bégaiements de la raison, bientôt dénaturés et obscurcis, embellis si l'on préfère, par les fables de toutes les mythologies.

Aura-t-on jamais à ce sujet des notions certaines? Je l'ignore. Mais on ne sera sans doute pas fâché de savoir quelles sont actuellement les plus vraisemblables conjectures, déduites des sciences qui méritent au plus haut degré la qualification de positives.

La géologie nous enseigne que la Terre, à son origine, existait à l'état fluide. Formée d'une immense agglomération de matière gazeuse, douée d'une température excessive, condensée à son centre, elle s'est lentement refroidie, puis resserrée en un globe liquide enveloppé d'une haute et épaisse atmosphère. Alors, par une nouvelle déperdition de chaleur, les couches superficielles de ce globe se sont peu à peu solidifiées, jusqu'à ce qu'un certain état d'équilibre général lui ait donné les dimensions et la forme qu'il affecte aujourd'hui.

Parmi les témoignages divers qui rendent cette histoire ancienne de la Terre extrêmement probable, il en est deux qui subsistent, et que tout le monde peut vérifier. C'est, d'une part, la température croissante des couches du sol, qui force à considérer le noyau intérieur de la Terre comme étant encore à l'état d'incandescence[1] : les éruptions volcaniques sont une preuve de plus à l'appui de cette hypothèse. Puis, c'est la forme même du globe terrestre ; c'est l'aplatissement de ce globe dans le sens de son axe de rotation : le renflement des parties équatoriales est la preuve mécanique de l'état fluide primitif.

Telles sont les données les plus certaines que l'on possède sur l'histoire ancienne de la Terre, dont on peut suivre ainsi les diverses évolutions. Il n'est pas facile sans doute d'assigner aux diverses phases de ce développement des époques certaines; mais, en pareille matière, les probabilités suffisent, et toutes s'accordent à donner à notre planète un âge dont l'ancienneté se compte par centaines de mille années, presque certainement par des millions.

La Terre est-elle la seule planète du monde solaire à qui l'on doive assigner une telle origine? A cet égard, les données précises manquent en partie ; et c'est à l'analogie qu'il faut laisser le soin de prononcer. J'ai dit que les données manquent. Je me trompe : il en est une qui est d'un grand poids, c'est le fait d'un commun aplatissement, qui est certain pour la Terre, Mars, Jupiter et Saturne, probable pour Mercure, et que la difficulté des mesures des différents diamètres de chaque disque planétaire a seule empêché de constater dans les autres planètes du

1. Plusieurs géologues contemporains, tout en admettant la fluidité primitive du globe terrestre, dont la forme aplatie est un témoignage irrécusable de cette fluidité, pensent que la solidification s'est faite du centre à la circonférence. Dès lors, ils considèrent le noyau actuel de la Terre comme solide; mais, entre ce noyau et l'écorce également solide, constituant le sol, il existerait des nappes d'une matière liquide et incandescente; c'est aux mouvements de cette couche et des gaz qui s'en dégagent, qu'ils attribuent les phénomènes volcaniques, les éruptions et les tremblements de terre.

monde solaire. Il est donc extrêmement probable que, à l'origine, le système solaire tout entier était formé d'une agglomération de matière à l'état gazéiforme, qui peu à peu s'est transformée en corps distincts, sous l'influence d'un refroidissement effectué pendant des milliers de siècles. Nous arrivons ainsi à l'hypothèse formulée par l'un des plus grands génies de la science moderne, par Laplace[1], qui a pu rendre compte ainsi de la plupart des phénomènes de l'astronomie planétaire. Je vais essayer de résumer en peu de mots cette théorie de l'origine des corps qui composent notre monde.

Si l'on remonte par la pensée jusqu'à une époque éloignée de la nôtre

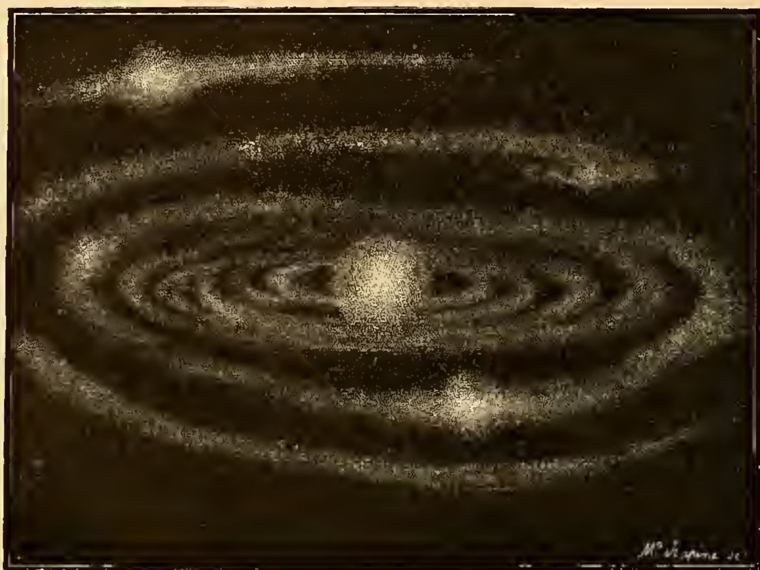


Fig. 361. Formation du monde planétaire. Le Soleil et les zones nébuleuses qui ont donné naissance aux planètes.

par une série considérable de siècles, le monde solaire tout entier, ou, plus exactement, toute la matière qui en forme aujourd'hui les divers groupes, existait à l'état purement gazeux, ou, si l'on veut, sous la forme d'une immense nébuleuse, extraordinairement diffuse, ne présentant

1. Antérieurement à Laplace, Kant, le grand philosophe de Kœnigsberg, avait donné, dans son *Histoire du Ciel*, l'esquisse d'une théorie ayant beaucoup d'analogie avec la simple note placée par l'illustre auteur de la *Mécanique céleste*, à la fin de son *Exposition du système du monde*. C'est l'heureuse rencontre de deux grands esprits.

Nous regrettons que le défaut d'espace nous oblige à résumer trop succinctement l'hypothèse de Laplace, et aussi à omettre les développements et modifications dont elle a été l'objet depuis. Nous y reviendrons ailleurs, mais nous devons dès maintenant citer les belles recherches de M. E. Roche et le savant Mémoire qu'il a publié sous ce titre : *Essai sur la constitution et l'origine du Monde solaire*, 1873.

aucun indice de condensation. Dans un tel état, les molécules de la nébulosité sont assez éloignées les unes des autres pour que la force répulsive dont elles sont douées annule entièrement la force attractive qui, les faisant graviter les unes vers les autres, tendrait sans cela à les réunir en groupes. Mais les siècles s'écoulent, la nébuleuse se refroidit peu à peu en rayonnant incessamment dans l'espace; l'action de la force répulsive diminue, et celle de l'attraction peut s'exercer de plus en plus; elle condense et rapproche en un ou plusieurs centres les diverses parties de la nébulosité diffuse. La nébuleuse solaire a donc dû finir par présenter l'aspect d'un noyau lumineux enveloppé à une grande distance d'une sorte d'atmosphère gazeuse, de forme à peu près sphérique. Telles nous apparaissent dans l'espace les étoiles nébuleuses ; on a vu, en effet, que les astronomes considèrent ces derniers systèmes comme irréductibles en étoiles, ou, si l'on veut, comme des soleils simples, doubles ou multiples, environnés d'une nébulosité réelle, soit lumineuse par elle-même, soit illuminée par l'astre central.

A cette période de sa formation, le Soleil existait seul encore; les planètes et leurs satellites restaient confondus dans le sein de l'atmosphère. Mais la masse entière était douée d'un mouvement de rotation qui entraînait dans un même sens, soit les molécules du noyau, soit celles de la nébulosité. A un moment donné, les limites de cette dernière dépendaient de la distance à laquelle la force centrifuge due au mouvement de rotation était en équilibre avec la force centrale de gravitation. Ces limites changeaient elles-mêmes et se rapprochaient nécessairement du centre, sous l'influence d'un refroidissement continu, qui avait pour conséquence la diminution de volume de la nébulosité. De là, l'abandon d'une zone de vapeur condensée, à la distance des limites primitives.

Peu à peu l'atmosphère céleste dut abandonner ainsi une série de zones de vapeur de plus en plus rapprochées du centre, les unes et les autres se trouvant à fort peu près dans le plan de l'équateur général, c'est-à-dire là où, pour la vitesse du mouvement de rotation, la force centrifuge était naturellement prépondérante.

Ce sont ces zones qui ont donné naissance aux planètes isolées ou aux groupes de planètes et d'astéroïdes.

Pour qu'il en fût autrement, pour que les zones détachées de la nébuleuse générale eussent conservé la forme d'anneaux concentriques au Soleil, il aurait fallu qu'un équilibre parfait eût continué d'exister entre les diverses molécules composant ces anneaux. Mais c'eût été là, selon l'expression de Laplace, un grand hasard.

Les anneaux se divisèrent, et les débris les plus considérables, attirant et s'agrégeant les autres, formèrent de nouveaux centres ou noyaux nébuleux. Ce qu'il importe maintenant de remarquer, c'est que chacun

d'eux dut être animé de deux mouvements simultanés, l'un de rotation autour de son propre centre, l'autre de translation autour du centre commun. De plus, comme ces deux mouvements n'étaient que la continuation du mouvement antérieur général, leur sens resta le même que celui de la rotation de tout le système ou du noyau solaire.

Les planètes une fois formées, on comprend parfaitement comment ces nébuleuses partielles, semblables à la nébulosité totale, purent donner naissance à de nouveaux corps gravitant et tournant autour de chacune d'elles : telle est l'origine des satellites.

Laplace explique alors comment les satellites ne formèrent plus de satellites nouveaux, et pourquoi ces corps secondaires présentent la même face à la planète autour de laquelle ils gravitent : c'est que la faible distance, donnant à l'attraction de celle-ci une influence prépondérante, les sphères composant les satellites, encore à l'état fluide, s'allongèrent vers le centre de la planète : et il en résulta pour le mouvement de rotation une durée presque identique à celle de leur mouvement de révolution. Après un certain nombre d'oscillations, ces durées devinrent rigoureusement égales.

Telle est, en peu de mots, la grandiose théorie que Laplace a du reste présentée au monde savant avec une réserve qui témoigne du profond respect que ce grand génie accordait aux vérités démontrées avec toute la rigueur de la science. Ce qu'il faut dire, c'est qu'elle est en parfait accord avec les lois de la mécanique générale, et avec les faits et les observations astronomiques et physiques. Sans nous étendre davantage à ce sujet, il est impossible de n'être point frappé de la concordance que présente le monde de Saturne avec la conception de l'illustre géomètre; Laplace insiste avec raison sur ce point.

« La distribution régulière de la masse des anneaux de Saturne autour de son centre et dans le plan de son équateur, résulte naturellement de cette hypothèse, et sans elle devient inexplicable; ces anneaux me paraissent être des preuves toujours subsistantes de l'extension primitive de l'atmosphère de Saturne et de ses retraites successives. »

FIN.

TABLE DES FIGURES.

PLANCHES EN NOIR ET EN COULEUR, HORS TEXTE.

FIGURES INSÉRÉES DANS LE TEXTE.

FIN DE LA TABLE DES FIGURES.

TABLE DES MATIÈRES.

PREMIÈRE PARTIE.

LE MONDE SOLAIRE.

LIVRE PREMIER.

LE SOLEIL.

LIVRE DEUXIÈME.

LES PLANÈTES.

LIVRE TROISIÈME.

LES COMÈTES. — LES ÉTOILES FILANTES. — LA LUMIÈRE ZODIACALE.

DEUXIÈME PARTIE.

LE MONDE SIDÉRAL.

LIVRE PREMIER.

LES ÉTOILES.

LIVRE DEUXIÈME.

LES NÉBULEUSES.

LIVRE TROISIÈME.

STRUCTURE DE L'UNIVERS VISIBLE.

TROISIÈME PARTIE.

APPENDICE.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

ERRATA

Page	35 (ligne 2 de la note),	*au lieu de*	Bessel	*lisez*	Encke.
—	288, ligne 2,	—	12 753	—	12 756.
—	791, ligne 20,	—	XXXIV	—	XLI.
—	814 (ligne 8 de la note),	—	566	—	565.
—	814 — 9 —	—	468	—	469.


WELLESLEY COLLEGE LIBRARY
3 5002 03262 4079